

DESCARREGADORES COM SOLEIRA EM LABIRINTO: ANÁLISE DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

JOEL DA SILVA FERNANDES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho

Coorientador: Doutor Rui Jorge Ferreira Aleixo

JANEIRO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-5081440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho e ao Doutor Rui Jorge Ferreira Aleixo pela disponibilidade, apoio e sugestões sempre pertinentes.

À minha família pelo carinho e compreensão pelas longas horas de convívio familiar sacrificadas a este trabalho.

RESUMO

Os descarregadores com soleira em labirinto são porventura, dos vários tipos de descarregadores de cheias, os de interesse mais recente pela investigação científica e dos que se mostram mais promissores numa altura em que a reabilitação dos aproveitamentos hidráulicos começa a ganhar importância em relação à construção de novos empreendimentos.

Este trabalho pretende contribuir para a sistematização dos procedimentos de dimensionamento destes órgãos, olhando para as diversas perspetivas dos vários autores. Os estudos disponíveis têm o inconveniente de não incluir a análise sistemática de todas as geometrias e parâmetros destes descarregadores.

Desta forma, neste estudo o autor propõe-se fazer uma pesquisa bibliográfica que inclua o que de mais significativo está publicado sobre o assunto, tentando fazer a seleção do conhecimento que mais importa para o dimensionamento dos descarregadores, e tentando também, contribuir com uma organização sistemática dos estudos e investigações dos vários autores ao longo dos anos.

Apresenta-se uma ferramenta de cálculo em Excel, que compilando a informação entretanto recolhida, pretende, de uma forma intuitiva e rápida, fazer o dimensionamento evitando o uso manual dos ábacos, e dando as perspetivas de cinco autores diferentes.

Por fim, usando a ferramenta de cálculo automático, realizou-se um estudo de sensibilidade aos diferentes parâmetros que caracterizam os descarregadores com soleira em labirinto.

PALAVRAS-CHAVE: aproveitamento hidráulico, barragem, descarregador de cheia, soleira em labirinto, dimensionamento

ABSTRACT

From the different types of flood dischargers, labyrinth weirs are among the most interesting subjects in their field of research, and among the most promising solutions when the rehabilitation of hydraulic facilities, such as dams, is required.

This work intends to contribute to the systematization of the labyrinth weirs design procedures by looking at the different perspectives by various authors. The available studies have the disadvantage of not covering all the geometries and parameters of these dischargers.

In this work a systematic bibliography survey is made in order to: identify the most significant works in the subject; to select the pertinent set of parameters used in the design of labyrinth weirs and to group the different criteria in a coherent way.

From the bibliography survey a computational tool was built to aid the design of labyrinth weirs. In this tool the different criteria were programmed thus avoiding manual computations, and allowing simultaneously to compare 5 different design methods.

Finally, using the proposed computational tool, a parameter sensitivity study on the labyrinth weirs variables is presented.

KEYWORDS: hydraulic power plant, dam, flood discharger, labyrinth weir, design

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	1
2 CARACTERIZAÇÃO DOS DESCARREGADORES COM SOLEIRA EM LABIRINTO	3
2.1. DESCARREGADORES DE CHEIA	3
2.1.1. DESCARREGADORES SOBRE A BARRAGEM	3
2.1.2. DESCARREGADORES EM ORIFÍCIOS ATRAVÉS DA BARRAGEM	5
2.1.3. DESCARREGADORES EM CANAL DE ENCOSTA	5
2.1.4. DESCARREGADORES EM POÇO	6
2.1.5. DESCARREGADORES DE DIQUES FUSÍVEIS.....	6
2.2. SOLEIRAS DESCARREGADORAS	8
2.3. DESCARREGADORES COM SOLEIRA EM LABIRINTO	9
2.3.1. VANTAGENS COMPARATIVAS DOS DESCARREGADORES EM LABIRINTO	12
2.3.2. DESCARREGADORES EM LABIRINTO NO MUNDO.....	12
2.3.3. GEOMETRIAS DO DESCARREGADOR EM PLANTA E DA CRISTA DA SOLEIRA.....	14
2.3.3.1. Crista de soleira em topo plano e em bisel	16
2.3.3.2. Crista de soleira em quarto de circunferência	16
2.3.3.3. Crista de soleira em meia lua	16
2.3.3.4. Crista de soleira com perfil tipo Ogee ou tipo WES.....	18
2.4. DIMENSIONAMENTO DE DESCARREGADORES COM SOLEIRA EM LABIRINTO	19
2.4.1. PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS E LIMITES DE APLICABILIDADE	19
2.4.2. CURVAS DE VAZÃO	21
2.4.2.1. Método de Hay e Taylor (1970).....	21
2.4.2.2. Método de Darvas (1971).....	22
2.4.2.3. Método de Magalhães e Lorena (1989)	24
2.4.2.4. Método de Lux e Hinchliff (1985).....	25
2.4.2.5. Método de Tullis (1995).....	26
3 FERRAMENTA DE CÁLCULO.....	29
3.1. OS MÉTODOS DE CÁLCULO	29
3.1.1. MÉTODO DE HAY E TAYLOR (1970).....	32

3.1.2. MÉTODO DE DARVAS (1971).....	34
3.2. LIMITES DE APLICABILIDADE	38
3.3. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	39
3.3.1. EXEMPLO 1 - DESCARREGADOR DE FORMA TRIANGULAR	39
3.3.2. EXEMPLO 2 - DESCARREGADOR DE FORMA TRAPEZOIDAL	43
4 RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS.....	45
4.1. ANÁLISE POR PARÂMETROS.....	45
4.1.1. LARGURA TOTAL DO DESCARREGADOR, W	45
4.1.2. VARIAÇÃO DO PARÂMETRO L/W	46
4.1.3. VARIAÇÃO DO PARÂMETRO H/P.....	47
4.1.4. VARIAÇÃO DE H	49
4.1.5. VARIAÇÃO DE P	50
4.2. ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS.....	51
4.2.1. DESCARREGADORES TRIANGULARES.....	51
4.2.1.1. Parâmetro l/w	51
4.2.1.2. Parâmetro H/p	53
4.2.2. DESCARREGADORES TRAPEZOIDAIS	55
4.2.2.1. Parâmetro l/w	55
4.2.2.2. Parâmetro H/p	57
5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	61
5.1. CONCLUSÕES	61
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Descarregadores sobre a barragem: a) descarga sobre bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico, b) descarga sobre bacia de dissipação de energia por trampolim submerso, c) descarga em trampolim livre na extremidade – salto de esqui, d) descarga em queda livre sobre bacia de receção revestida a betão e) descarga simultânea sobre a barragem e em orifício, com jatos cruzados para dissipação de energia (Adaptado de Lencastre, 1984).....	4
Figura 2.2 – Descarregador em canal de encosta – Barragem de Alijó (retirado de http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Alijo.htm).....	5
Figura 2.3 – Descarregador em poço – Esquema de funcionamento (adaptado de Lencastre (1984)) e barragem de Campilhas – Cercal do Alentejo (retirado de www.waymarking.com).	6
Figura 2.4 – Descarregador de dique fusível - Barragem de Warragamba (retirado de http://www.visitsydneyaustralia.com.au/warragamba.html).....	6
Figura 2.5 – Soleira descarregadora espessa tipo WES (Pinheiro, 2007).....	8
Figura 2.6 – Soleira descarregadora em bico de pato – Barragem da Apartadura (retirado de http://fotos.sapo.pt/josebotelho/fotos/?uid=9QS8nTdr71zeh4gEWnzv).....	8
Figura 2.7 – Soleira descarregadora em banheira – Barragem de Malinao, Filipinas (retirado de http://tubagbohol.mikeligalig.com/pilar/a-succinct-time-in-my-homeland/).....	9
Figura 2.8 - Diferentes configurações em planta dos descarregadores com soleira em labirinto.....	9
Figura 2.9 - Descarregador em Piano (retirado de http://wbi.worldbank.org).	10
Figura 2.10 - Descarregador em Piano – configuração A (retirado de Schleiss, 2011).	11
Figura 2.11 - Descarregador em Piano – configuração B (retirado de Schleiss, 2011).	11
Figura 2.12 - Descarregador com soleira em labirinto de forma triangular(apo.sdsu.edu/cive530_lecture_09.html).	14
Figura 2.13 – Descarregador com soleira em labirinto de forma trapezoidal - barragem de Sta. Justa (www.tpfplaneje.pt).	14
Figura 2.14 – Dimensões de um descarregador com soleira em labirinto.....	15
Figura 2.15 – Diferentes formas das soleiras de um descarregador com soleira em labirinto.	15
Figura 2.16 – Coeficiente de vazão para um descarregador de soleira com perfil em quarto de circunferência, Tullis (1995) (adaptado de Falvey, 2003).	16
Figura 2.17 – Condições de escoamento em soleiras em meia lua (adaptado de Falvey, 2003).....	17
Figura 2.18 – Coeficiente de vazão para um descarregador de soleira com perfil em meia lua, por Rouvé e Indlekofer (1974), citados por Falvey (2003) (adaptado de Falvey, 2003).	18
Figura 2.19 – Coeficiente de vazão para um descarregador com soleira em perfil tiponormal, com base nas curvas de Hoffman (1974), citado por Falvey (2003) (adaptado de Falvey, 2003).	19
Figura 2.20 – Eficácia, ϵ , em descarregadores de forma triangular (adaptado de Falvey, 2003).....	20
Figura 2.21 – Curvas de Darvas (1971), obtidas para um descarregador com soleira em labirinto de forma trapezoidal e perfil de crista com a forma de um quarto de circunferência (adaptado de Falvey, 2003).	23

Figura 2.22 – Curvas de Darvas alteradas por Magalhães (adaptado de Magalhães, 1983).....	23
Figura 2.23 – Ábaco para o cálculo do coeficiente de vazão, μ_w , de Magalhães e Lorena, adaptado de Magalhães e Lorena (1989).	24
Quadro 2.24 – Comparação entre os valores de μ_w obtidos nos ensaios em modelos hidráulicos, com os valores obtidos dos ábacos de Darvas (1971) e de Magalhães e Lorena (1989) (adaptado de Magalhães e Lorena, 1989).....	25
Figura 3.1 – Tabela 1: Dados de Entrada (pormenor a)).	30
Figura 3.2 – Tabela 1: Dados de Entrada (pormenor b)).	30
Figura 3.3 – Tabela 2: Dimensões do Descarregador e Outros Rácios (pormenor a)).	30
Figura 3.4 – Tabela 2: Dimensões do Descarregador e Outros Rácios (pormenor b)).	31
Figura 3.5 – Tabela 3: Resultados (pormenor).....	31
Figura 3.6 – Tabela 4: Quadro Resumo dos Resultados.....	31
Figura 3.7 – Fluxograma do processo adotado na ferramenta de cálculo automático do caudal.....	32
Figura 3.8 – Fluxograma do processo de cálculo do caudal Q_L pelo método de Hay e Taylor (1970). 34	
Figura 3.9 – Fluxograma do processo de cálculo do caudal Q_L pelo método de Darvas (1971).....	35
Figura 3.10 – Fluxograma do processo de cálculo do caudal Q_L pelo método de Tullis (1995).....	38
Figura 3.11 – Ângulo α e parâmetro H/p fora dos limites de aplicação da ferramenta de cálculo, e consequentes mensagens automáticas (pormenor da tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Rácios”).	39
Figura 3.12 – Parâmetro I_0/b acima do limite (pormenor da tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Rácios”).	39
Figura 3.13 – Exemplo 1: Tabela 1 “Dados de Entrada”(pormenor).	40
Figura 3.14 – Exemplo 1: Tabela 1 “Dados de Entrada” (pormenor).	40
Figura 3.15 – Exemplo 1: Tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros” (pormenor).	40
Figura 3.16 – Exemplo 1: Tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros” (pormenor).	40
Figura 3.17 – Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” - método de Hay e Taylor (1970), antes do processo iterativo (pormenor).	41
Figura 3.18 – Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” - método de Hay e Taylor (1970), 1ª iteração (pormenor).....	41
Figura 3.19 – Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” - método de Hay e Taylor (1970), resultado final (pormenor).....	42
Figura 3.20 – Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” - método de Hay e Taylor (1970), resultado final (pormenor b).....	42
Figura 3.21 – Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” – valores de Q_L obtidos pelo método de Lux e Hinchliff (1985).....	42

Figura 3.22 – Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” – valores de Q_L obtidos pelo método de Tullis (1995).	43
Figura 3.23 – Exemplo 1: Tabela 4 - “Quadro Resumo dos Resultados” – resultados finais dos diferentes métodos.....	43
Figura 3.24 – Exemplo 2: Tabela 1 “Dados de Entrada” (pormenor).	43
Figura 3.25 – Exemplo 2: Tabela 1 “Dados de Entrada” (pormenor).	44
Figura 3.26 – Exemplo 2: Tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros” (pormenor).	44
Figura 3.27 – Exemplo 2: Tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros” (pormenor).	44
Figura 3.28 – Exemplo 2: Tabela 4 “Quadro Resumo dos Resultados” – resultados finais dos diferentes métodos.....	44
Figura 4.1 – Variação do caudal, Q_L , em função da largura total do descarregador, W , para descarregadores triangulares.....	46
Figura 4.2 – Variação do caudal, Q_L , em função da largura total do descarregador, W , para descarregadores trapezoidais.	46
Figura 4.3 – Variação do caudal, Q_L , em função do parâmetro l/w , para descarregadores triangulares.	47
Figura 4.4 – Variação do caudal, Q_L em função do parâmetro l/w , para descarregadores trapezoidais.	47
Figura 4.5 – Variação do caudal, Q_L , em função do parâmetro H/p , para descarregadores triangulares.	48
Figura 4.6 – Variação do caudal, Q_L , em função do parâmetro H/p , para descarregadores trapezoidais.	48
Figura 4.7 – Variação do caudal, Q_L , em função da altura, H , para descarregadores triangulares.	49
Figura 4.8 – Variação do caudal, Q_L , em função da altura, H , para descarregadores trapezoidais. ...	49
Figura 4.9 – Variação do caudal, Q_L , em função da altura do descarregador, p , para descarregadores triangulares.....	50
Figura 4.10 – Variação do caudal, Q_L , em função da altura do descarregador, p , para descarregadores trapezoidais.	50
Figura 4.11 – Valores do caudal, Q_L , em função do parâmetro l/w , em descarregadores triangulares	52
Figura 4.12 – Valores do caudal, Q_L , em função do parâmetro H/p , em descarregadores triangulares	55
Figura 4.13 – Valores do caudal, Q_L , em função do parâmetro l/w , em descarregadores trapezoidais	57
Figura 4.14 – Valores do caudal, Q_L , em função do parâmetro H/p , em descarregadores trapezoidais	60

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Descarregadores de Cheia: classificação e principais características (adaptado de Quintela, 1990).	7
Quadro 2.2 – Descarregadores com soleira em labirinto construídos em Portugal (adaptado de Crookston, 2010).	12
Quadro 2.3 – Descarregadores com soleira em labirinto construídos no estrangeiro (adaptado de Crookston, 2010).	13
Quadro 3.1 – Funções de ajuste às curvas do ábaco de Hay e Taylor (1970).	33
Quadro 3.2 – Funções de ajuste às curvas do ábaco de Darvas(1971).	35
Quadro 3.3 – Funções de ajuste às curvas do ábaco de Magalhães e Lorena (1989).	36
Quadro 3.4 – Funções de ajuste às curvas do ábaco de Tullis (1995).	37
Quadro 4.1– Dados para a comparação dos métodos em relação ao parâmetro l/w , em descarregadores triangulares.	51
Quadro 4.2– Caudais resultantes, Q_L , da variação no parâmetro l/w , em descarregadores triangulares (em m^3/s).	52
Quadro 4.3– Dados de entrada – descarregadores triangulares – parâmetro H/p variável	53
Quadro 4.4– Caudais resultantes, Q_L , da variação no parâmetro H/p , em descarregadores triangulares (em m^3/s).	54
Quadro 4.5– Dados de entrada para análise do efeito da variação de l/w em descarregadores de forma trapezoidal.	56
Quadro 4.6– Caudais resultantes, Q_L , da variação no parâmetro l/w , em descarregadores trapezoidais (em m^3/s)	56
Quadro 4.7– Dados de entrada para análise do efeito da variação de H/p em descarregadores de forma trapezoidal.	58
Quadro 4.8– Caudais resultantes nos 4 métodos em descarregadores trapezoidais sujeitos a variação do parâmetro H/p (valores em m^3/s).	59

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

- a – metade do comprimento da parede perpendicular ao escoamento do descarregador em labirinto [m]
- b – comprimento da parede longitudinal do descarregador em labirinto [m]
- c – profundidade do descarregador em labirinto [m]
- C_0 – cota do pavimento do descarregador [m]
- CC – cota da crista [m]
- C_d – coeficiente de vazão de um descarregador linear [-]
- C_W – coeficiente de vazão do método de Darvas [-]
- $C_d(\alpha)$ – coeficiente de vazão de um descarregador com soleira em labirinto de ângulo α [-]
- $C_d(90^\circ)$ – coeficiente de vazão de um descarregador linear com a mesma largura [-]
- C_X – coeficiente de vazão do método de Lux e Hinchliff [-]
- C_T – coeficiente de vazão do método de Tullis et al. [-]
- l – comprimento da soleira de um módulo de um descarregador em labirinto [m]
- l_d – comprimento de interferência [m]
- L – comprimento total da soleira de um descarregador [m]
- L_d – comprimento de turbulência [m]
- g – aceleração da gravidade [m/s^2]
- h – carga hidráulica [m]
- H – carga total [m]
- H_d – carga de projeto [m]
- n – número de módulos de um descarregador em labirinto
- NMC – nível de máxima cheia [m]
- NPA – nível de pleno armazenamento [m]
- p – altura do descarregador [m]
- P_C – pressão na soleira [N/m^2]
- Q – caudal afluente [m^3/s]
- Q_C – caudal escoado por módulo no método de Lux e Hinchliff [m^3/s]
- Q_L – caudal escoado por um descarregador em labirinto de largura W [m^3/s]
- Q_N – caudal escoado por um descarregador linear de largura W [m^3/s]
- r – raio de curvatura do perfil da soleira [m]
- R^2 – coeficiente de correlação [-]
- V – velocidade de escoamento afluente [m/s]
- w – largura de um módulo de um descarregador em labirinto [m]

W – largura de um descarregador [m]

Y_0 – profundidade de água na soleira [m]

X – coordenada horizontal [m]

Y – coordenada vertical [m]

α – ângulo que a parede longitudinal do descarregador faz com o sentido do escoamento [°]

α_{max} – ângulo máximo que a parede longitudinal do descarregador faz com o sentido do escoamento [°]

ε – eficácia [-]

γ - peso específico da água [N/m³]

ρ – massa volúmica da água [kg/m³]

μ_w – coeficiente de vazão dos métodos de Darvas e Magalhães e Lorena [-]

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IST – Instituto Superior Técnico

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NMC – Nível de Máxima Cheia

USBR – United States Bureau of Reclamation

WES – Waterways Experiment Station

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS

Tradicionalmente, os descarregadores de cheia apresentam uma forma linear perpendicular ao sentido do escoamento. Os descarregadores de soleira em labirinto têm a particularidade de, em planta, apresentarem uma soleira cuja crista é uma linha quebrada, poligonal, com módulos repetidos ao longo do canal de descarga. São em geral módulos, de formas triangulares, trapezoidais ou retangulares, permitindo assim aumentar o comprimento da soleira por unidade de largura do canal de descarga. Esta característica faz com que esta possa ser uma solução na reabilitação de barragens, que muitas vezes apresentam limitações na largura dos descarregadores, para se compatibilizar com dimensões de outros órgãos da barragem já construídos.

Os primeiros estudos sobre este tipo de descarregador datam de 1854 (Boileau) e 1907 (Aichel), sendo que os primeiros descarregadores deste tipo construídos datam dos anos 1940, segundo Magalhães (1983) - Woronora, Austrália, em 1941 e Beni Bahdel, na Argélia, em 1944.

Sendo uma solução relativamente recente, muitos dos estudos e bibliografia publicada, têm uma divulgação ainda limitada na comunidade científica. O dimensionamento é realizado com base em estudos em modelos físicos levados à prática desde o fim dos anos 1960, princípios de 70, que se sintetizam em ábacos para o cálculo de coeficientes de vazão para as respetivas condições dos ensaios, e das fórmulas que cada autor propõe para o cálculo do caudal.

O presente trabalho tem como principais objetivos: compilar e sistematizar alguma da principal informação existente sobre os descarregadores com soleira em labirinto, salientando os aspetos mais importantes a ter em conta no dimensionamento destes órgãos; introduzir o tema na FEUP, servindo de base para futuros trabalhos; desenvolver uma ferramenta de cálculo automático para o dimensionamento dos parâmetros característicos dos descarregadores com soleira em labirinto, que sintetiza métodos apresentados por diferentes autores, com base nos ábacos e leis de vazão apresentados. Esta ferramenta de cálculo permite, de forma rápida, testar e comparar diferentes geometrias, sem recorrer aos tradicionais ábacos.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos cujo conteúdo se descreve sucintamente:

- **Capítulo 1 – Introdução** – Enquadramento geral e objetivos.
- **Capítulo 2 – Descarregadores em Labirinto: Caracterização** – breve descrição dos descarregadores de cheias existentes; análise detalhada das geometrias que os descarregadores com soleira em labirinto apresentam e principais parâmetros a ter em conta na sua análise;

apresentação das leis de vazão e ábacos de cálculo dos diferentes autores; critérios e métodos a ter em conta no dimensionamento destes descarregadores;

- **Capítulo 3 – Ferramenta de Cálculo** – apresentação e descrição da construção do modelo, explicação do seu funcionamento e de como interpretar os resultados; exemplos de aplicação;
- **Capítulo 4 – Análise de Resultados e Discussão** – análise do modo de funcionamento e das especificidades dos descarregadores de soleira em labirinto, fazendo uso da ferramenta de cálculo automático desenvolvida; apresentação dos resultados da variação de alguns dos parâmetros e sua interpretação;
- **Capítulo 5 – Conclusões** – apresentação das conclusões obtidas.

2

CARACTERIZAÇÃO DOS DESCARREGADORES COM SOLEIRA EM LABIRINTO

2.1. DESCARREGADORES DE CHEIA

Os descarregadores de cheias são um dos órgãos de segurança essenciais das barragens, que segundo Lencastre (1984), consistem num descarregador de superfície – descarga de cheias –, que também garante a eliminação do transporte sólido, e num descarregador de fundo, que permite o esvaziamento da albufeira para observações e reparações, o controlo do primeiro enchimento e que pode também funcionar perante a necessidade de um rápido esvaziamento. Em vários sistemas poderá existir ainda, descarregador de meio-fundo.

Os descarregadores de cheias destinam-se a garantir que o nível de máxima cheia (NMC) nunca é ultrapassado, ou dito de outra forma, destinam-se a evacuar os caudais de cheia na secção da barragem, evitando assim que esta seja galgada, e por outro lado, evitar que a erosão afete as fundações.

Os tipos de descarregadores e sua constituição dependem, essencialmente, do tipo de barragem, do material da sua construção, bem como das condições topográficas e hidráulicas do local da sua construção.

A opção por certo tipo de descarregador, será sempre uma decisão ponderada que para além de levar em conta os critérios atrás referidos, não poderá prescindir de uma análise dos critérios económicos e de segurança.

Há dois critérios principais para a classificação dos descarregadores (Quintela, 1990):

- A localização e o controlo de caudal;
- O guiamento da lâmina líquida e o modo de dispersão de energia.

A seguir apresenta-se uma breve descrição dos diferentes tipos de descarregadores, destacando-se as suas principais características (Lencastre, 1984; Instituto da Água, 2001).

2.1.1. DESCARREGADORES SOBRE A BARRAGEM

Os descarregadores sobre a barragem podem empregar-se em barragens de betão de qualquer tipo, podendo a descarga fazer-se livremente ou ser controlada por comportas.

A lâmina líquida pode atingir diretamente o leito do rio, ou ser guiada por túnel ou canal, que se apoia no total ou em parte sobre a barragem, terminando numa bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico, ou por trampolim submerso (Fig. 2.1. a) e b)).

Havendo condições de dissipação que o permitam, nomeadamente leito rochoso de suficiente resistência, uma das variações destes descarregadores consiste num trampolim livre na extremidade – salto de esqui – caso em que a dissipação de energia se dá pela queda num colchão de água. (Fig. 2.1. c)).

Uma outra variação, foram os descarregadores de superfície em queda livre, providos muitas vezes de dispersores do jato ou pequenos trampolins, com bacia de receção, em geral revestida a betão (Fig. 2.1. d)).

No caso de barragens de pequena altura, do tipo móvel, em que grande parte da área de obstrução é conseguida por comportas, a passagem do caudal de dimensionamento faz-se com pequena sobrelevação do nível a montante e, portanto, com afogamento.

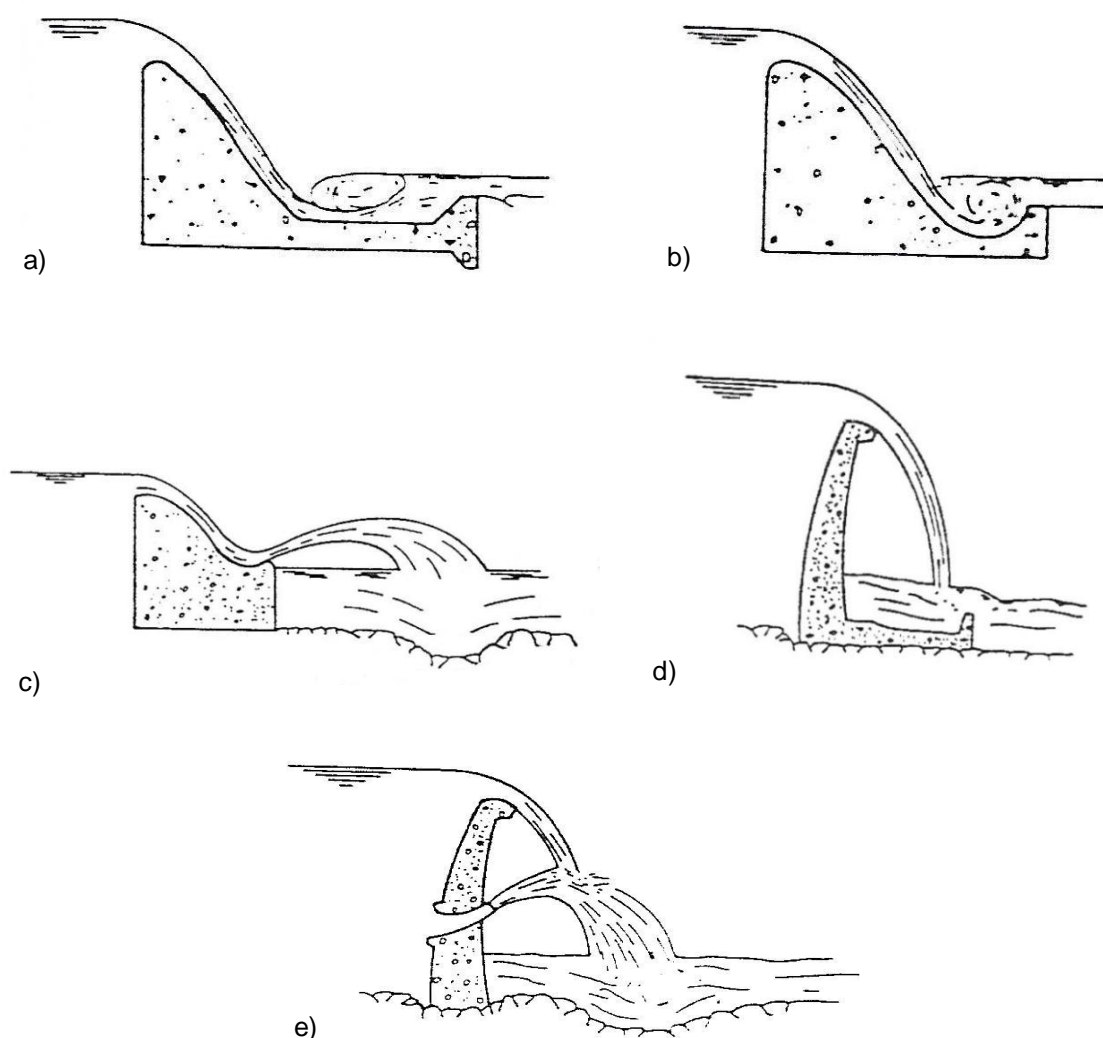


Figura 2.1- Descarregadores sobre a barragem: a) descarga sobre bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico, b) descarga sobre bacia de dissipação de energia por trampolim submerso, c) descarga em trampolim livre na extremidade – salto de esqui, d) descarga em queda livre sobre bacia de receção revestida a betão e) descarga simultânea sobre a barragem e em orifício, com jatos cruzados para dissipação de energia (Adaptado de Lencastre, 1984).

2.1.2.DESCARREGADORES EM ORIFÍCIOS ATRAVÉS DA BARRAGEM

Os descarregadores em orifícios podem empregar-se em barragens de betão de qualquer tipo e são controlados por comportas.

A lâmina líquida, para jusante do orifício, pode seguir livremente atingindo o leito do rio próximo do pé da barragem (orifícios sob cargas pequenas), ou longe dela (orifícios sob cargas elevadas), ou numa bacia de dissipação.

As soluções de queda livre junto do pé da barragem exigem rocha de boa qualidade na zona de impacto, sendo necessário ainda o revestimento dessa zona por lajes de betão armado, ancoradas à fundação e, por vezes, de açudes a jusante que aumentam a espessura do colchão de água em relação às condições naturais.

Recorre-se, por vezes, a descarga, simultaneamente no mesmo perfil, sobre a barragem e através de orifícios, com a finalidade de aproveitar as condições mais favoráveis de dissipação de energia de jatos cruzados (Fig. 2.1. e)).

2.1.3.DESCARREGADORES EM CANAL DE ENCOSTA

Os descarregadores em canal de encosta são aplicáveis a todo o tipo de barragem, sendo muito comuns em barragens de aterro, e são constituídos por um canal de secção retangular, com soleira eventualmente em degraus. Localizam-se nas encostas das margens do aproveitamento e o controlo do escoamento pode ser realizado ou não por comporta.

A dissipação de energia é, em geral, no leito do rio, podendo ou não ter obra de dissipação.



Figura 2.2– Descarregador em canal de encosta – Barragem de Alijó (retirado de http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Alijo.htm).

2.1.4. DESCARREGADORES EM POÇO

Os descarregadores em poço, verticais ou inclinados, são seguidos de uma galeria escavada em subterrâneo, na encosta, ou de conduta construída na fundação da barragem (Fig. 2.3). São utilizados em barragens de aterro, podendo também ser adotados em barragens de betão.

Os descarregadores em poço têm a vantagem de, em certos casos, permitirem a utilização de parte das galerias ou das condutas de desvio provisório como galerias ou condutas a jusante do poço.



Figura 2.3– Descarregador em poço – Esquema de funcionamento (adaptado de Lencastre (1984)) e barragem de Campilhas – Cercal do Alentejo (retirado de www.waymarking.com).

2.1.5. DESCARREGADORES DE DIQUES FUSÍVEIS

Os descarregadores de cheias de diques fusíveis podem ser adotados para funcionar na emergência de ser excedido o caudal de dimensionamento do descarregador principal (Fig. 2.4). São constituídos, em geral, por um perfil em aterro construído sobre soleira de betão. Quando se dá o galgamento do aterro, inicia-se o processo de destruição do dique fusível; à medida que esta erosão se conclui, o descarregador entra em pleno funcionamento. Normalmente, o descarregador do dique fusível dá passagem para uma linha de água lateral, devendo o seu fundo ser rochoso, para evitar o seu aprofundamento e a vazão de um caudal incontrollado.



Figura 2.4– Descarregador de dique fusível - Barragem de Warragamba (retirado de <http://www.visitsydneyaustralia.com.au/warragamba.html>).

No quadro 2.1, apresenta-se um resumo dos principais tipos de descarregadores em função das suas características.

Quadro 2.1 – Descarregadores de Cheia: classificação e principais características (adaptado de Quintela, 1990).

Crítério	Aplicação	Aplicabilidade	Controlo de escoamento
(A) Localização	A.1. Sobre a barragem	Barragens de betão.	Descarga livre, por sifão ou controlada por comportas.
		Barragens de aterro (descarregadores não convencionais).	Descarga livre.
	A.2. Orifícios através da barragem	Barragens de betão	Descarga controlada por comportas.
	A.3. Canal de encosta	Barragens de qualquer tipo. Independente da estrutura da barragem	Descarga livre ou controlada por comportas.
	A.4. Poço, vertical ou inclinado	Barragem de aterro ou enrocamento (poço, seguido de galeria sob a barragem). Barragem de qualquer tipo (galeria escavada).	Descarga livre ou controlada por comportas.
	A.5. Fusível	Qualquer barragem (de emergência, lateral à barragem).	Descarga livre.
(B) Guiamento da lâmina líquida e dissipação de energia	Classificação	Características	
	B.1. Queda livre e obra de dissipação de energia	Com ou sem sobreelevação do nível natural do rio. Localização e controlo segundo A.1. ou A.2.	
	B.2. Queda livre e dissipação de energia no leito	Com ou sem sobreelevação do nível natural do rio. Localização e controlo segundo A.1. ou A.2.	
	B.3. Queda guiada e trampolim de saída com dissipação de energia no leito	Com ou sem proteção do leito, com ou sem sobreelevação do nível natural do rio. Localização e controlo segundo A.1., A.2., A.3. e A.4.	
	B.4. Queda guiada e obra de dissipação de energia	Localização e controlo segundo A.1., A.2., A.3. e A.4	

2.2.SOLEIRAS DESCARREGADORAS

As soleiras descarregadoras constituem um tipo importante dos descarregadores. A sua escolha será condicionada pelo tipo de descarregador e características do aproveitamento e curso de água em que se insere. As soleiras descarregadoras devem, para além de ser económicas, permitir uma descarga eficiente dos caudais de cheia.

Existem vários tipos de soleiras, resultado de diferentes classificações. Podem ser classificadas, em função da superfície de contacto com a lâmina líquida, como soleiras espessas, se o contacto for ao longo de uma superfície, ou como soleiras delgadas, se o contacto ocorrer ao longo de uma linha.

Outra classificação existente para as soleiras baseia-se no seu traçado em planta, podendo-se distinguir soleiras retilíneas, em que o traçado é em linha reta, ou soleiras curvas, se a soleira apresenta, em planta, uma linha curva, de que é exemplo a soleira dos descarregadores em poço (Fig. 2.3).

Para além das soleiras espessas tipo WES (Fig. 2.15), frequentemente utilizadas dada a facilidade de definição do seu perfil (Fig. 2.5), surgiram, mais recentemente, vários tipos de soleira em que o desenvolvimento da crista é superior ao do canal em que se inserem, permitindo uma maior vazão. Como exemplo, referem-se as soleiras em bico de pato (Fig. 2.6), soleira em banheira (Fig. 2.7) e as soleiras em labirinto, que serão apresentadas e caracterizadas na secção seguinte.



Figura 2.5– Soleira descarregadora espessa tipo WES (Pinheiro, 2007).



Figura 2.6– Soleira descarregadora em bico de pato – Barragem da Apartadura (retirado de <http://fotos.sapo.pt/josebotelho/fotos/?uid=9QS8nTdr71zeh4gEWnzv>).



Figura 2.7– Soleira descarregadora em banheira – Barragem de Malinao, Filipinas (retirado de <http://tubagbohol.mikeligalig.com/pilar/a-succinct-time-in-my-homeland/>).

2.3. DESCARREGADORES COM SOLEIRA EM LABIRINTO

Os descarregadores com soleira em labirinto são um caso particular dos descarregadores de cheia de superfície. Ao contrário destes descarregadores, que têm uma orientação em planta perpendicular ao sentido do escoamento, os descarregadores com soleira em labirinto apresentam a configuração em planta, de uma linha quebrada, repetindo em geral módulos de forma poligonal.

A consequência – e motivo para a sua existência – é o maior comprimento de crista que se obtém para uma mesma largura, em relação a um descarregador de soleira perpendicular ao sentido do escoamento, permitindo um maior caudal descarregado.

Outros tipos de descarregadores com soleira não retilínea têm sido testados ao longo do tempo, como os descarregadores com soleira oblíqua em planta, ou com forma em bico de pato. Contudo os descarregadores com soleira em labirinto, triangulares, trapezoidais ou retangulares, têm sido alvo de desenvolvimento, de estudos em modelos físicos, e com mais frequência levados à realização prática (Fig. 2.8).

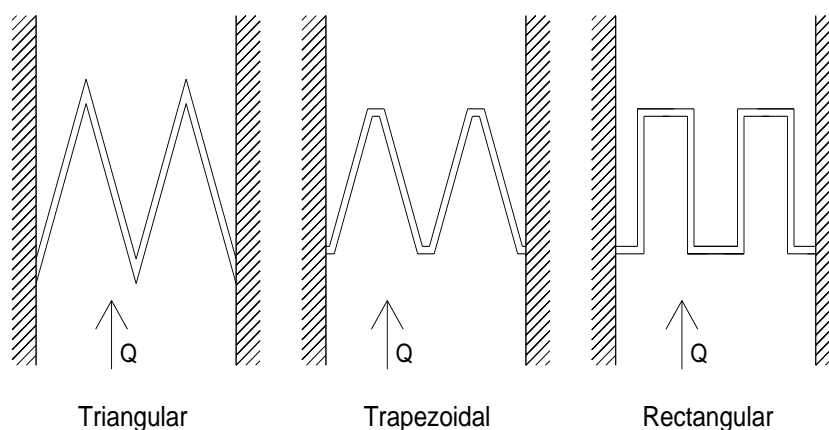


Figura 2.8- Diferentes configurações em planta dos descarregadores com soleira em labirinto.

De acordo com Gentilini, (1941), citado por Magalhães (1983) os primeiros estudos sobre este tipo de descarregadores datam de 1854 (Boileau, 1854) e de 1907 (Aichel, 1907). Posteriormente, mais autores publicaram estudos com as conclusões das suas investigações sobre o tema: Tison e Franssen (1963), Hay e Taylor (1969, 1970 e 1972), Darvas (1971), Magalhães (1985), Lux e Hinchliff (1985), Tulliset al., (1995) e Falvey (2003).

Um caso particular que resultou da evolução dos descarregadores de soleira em labirinto, são os chamados descarregadores com soleira em piano, originalmente desenvolvido por Lempérière em 2001 (Fig. 2.9). Este tipo de descarregador alia uma das vantagens do descarregador com soleira em labirinto - o maior comprimento da sua crista em relação a um descarregador frontal (com soleira retilínea) -, com as reduzidas dimensões em planta das suas fundações, devido a uma grande parte da sua crista estar em consola (Fig. 2.8). Este facto, para além das óbvias vantagens económicas, facilita muitas vezes a inserção do descarregador na crista de barragens já existentes, em especial nas de gravidade (Schleiss, 2011).

Inicialmente, os descarregadores com soleira em piano eram essencialmente de dois tipos (Lempérière & Ouamane (2003), citado por Schleiss, 2011):

- Configuração A: os vértices dos paramentos perpendiculares ao escoamento tanto nos lados do sentido afluente como nos do sentido efluente, estão em consola. Esta estrutura auto-equilibrada favorece o uso de elementos pré-fabricados (Fig. 2.10);
- Configuração B: só nos lados do sentido afluente do escoamento é que os vértices dos paramentos perpendiculares estão em consola (Fig. 2.11).

Os descarregadores de soleira em piano têm especificidades geométricas que os distinguem dos de soleira em labirinto. Desde logo a largura de cada um dos elementos (de cada “tecla”), o grau de inclinação da base nos elementos, tanto naqueles cujo escoamento é afluente, como nos em que é efluente e também no comprimento de cada um dos elementos.



Figura 2.9- Descarregador em Piano (retirado de <http://wbi.worldbank.org>).

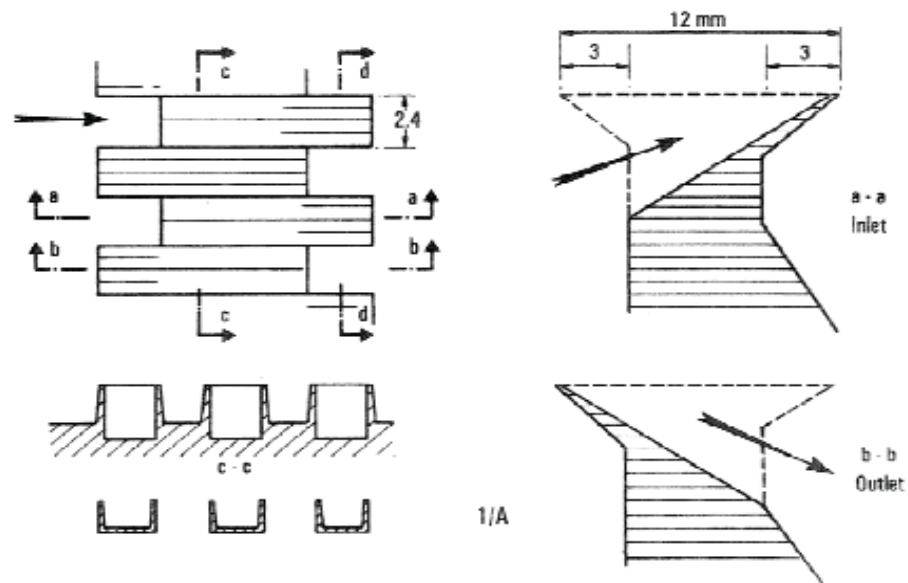


Figura 2.10- Descarregador em Plano – configuração A (retirado de Schleiss, 2011).

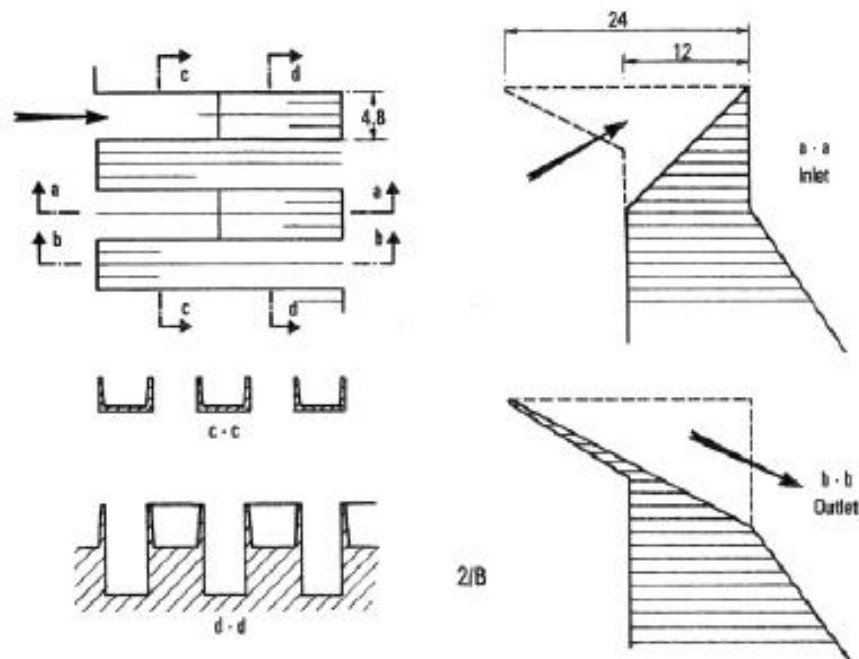


Figura 2.11- Descarregador em Plano – configuração B (retirado de Schleiss, 2011).

2.3.1.VANTAGENS COMPARATIVAS DOS DESCARREGADORES EM LABIRINTO

Como foi referido anteriormente, os descarregadores em labirinto em comparação com os descarregadores tradicionais, de soleira retilínea, têm como resultado da sua configuração, um comprimento de crista superior; este facto, entre outros, permite que estes descarregadores apresentem várias vantagens. Segundo Falvey (2003) e Crookston (2010), estas são as principais:

- Para a mesma altura de água sobre a crista, H , a vazão é maior;
- Consequência da anterior, para um mesmo caudal de cheia, a cota da crista poderá ser superior, aumentando a capacidade da albufeira;
- Em projetos de reabilitação, em que a largura está condicionada pela existente, a implementação de um descarregador de soleira em labirinto poderá responder a uma exigência de incremento do caudal de cheia de projeto, quer porque se provou que o caudal original estava subavaliado em algum momento do decurso do funcionamento do descarregador existente, quer porque à luz dos elementos hidrológicos atuais este deverá ser superior, ou quer ainda porque o projeto prevê um aumento do fator de segurança;
- Devido ao seu modo de funcionamento, nomeadamente ao facto de as alturas de água sobre a crista serem menores para iguais vazões, contribuem para a dissipação de energia dos escoamentos efluentes;
- Contribuem para a oxigenação da água.

2.3.2.DESCARREGADORES EM LABIRINTO NO MUNDO

O primeiro descarregador com soleira em labirinto de que há registo de ter sido construído é o da barragem de East Park em 1910 (Magalhães, 1983) e desde então, o número deste tipo de descarregadores aumentou enormemente, tanto em Portugal como no estrangeiro. Portugal, logo atrás dos EUA, tem sido dos países em que esta solução mais tem vingado.

Crookston (2010) listou os casos conhecidos até ao momento de descarregadores com soleira em labirinto, que se apresentam nos quadros 2.2 e 2.3.

Quadro 2.2 – Descarregadores com soleira em labirinto construídos em Portugal (adaptado de Crookston, 2010).

Nome	Localização	Fonte
Água Branca	Portugal	Quintela et al. (2000)
Alfaiates	Portugal	Quintela et al. (2000)
Alijó	Portugal	Magalhães e Lorena (1989)
Arcossó	Portugal	Quintela et al. (2000)
Calde	Portugal	Quintela et al. (2000)
Gema	Portugal	Magalhães e Lorena (1989)
Pisão	Portugal	Quintela et al. (2000)
São Domingos	Portugal	Magalhães e Lorena (1989)
Santa Justa	Portugal	Magalhães e Lorena (1989)
Teja	Portugal	Quintela et al. (2000)

Quadro 2.3 – Descarregadores com soleira em labirinto construídos no estrangeiro (adaptado de Crookston, 2010).

Nome	Localização	Fonte
Bartletts Ferry	EUA	Mayer (1980)
Boardman	EUA	Babb (1976), Lux (1985)
BoydeLake	EUA	Brinker (2005)
Brazos	EUA	Tullis e Young (2005)
Carty	EUA	Afshar (1988)
DogRiver	EUA	Savageet al. (2004)
EastPark	EUA	Magalhães e Lorena (1989)
Forestport	EUA	Lux (1989)
Garland Canal	EUA	Lux e Hinchliff (1985)
Hyrum	EUA	Houston (1983)
LakeTownsend	EUA	Tullis e Crookston (2008)
Mercer	EUA	CH2M-Hill (1976)
Prado	EUA	Copeland e Fletcher (2000)
Quincy	EUA	Magalhães e Lorena (1989)
Ritschard	EUA	Vermeyen (1991)
Rollins Dam	EUA	Tullis (1986)
Sam RayburnLake	EUA	USACE (1991)
StandleyLake	EUA	Tullis (1983)
Ute	EUA	Houston (1982)
Weatherford	EUA	Tullis (1982)
Beni Bahdel	Argélia	Afshar (1988)
Harezza	Argélia	Lux (1989)
Keddara	Argélia	Magalhães e Lorena (1989)
Sarno	Argélia	Afshar (1988)
Juturnaiba	Brasil	Afshar (1988)
Pacoti	Brasil	Magalhães e Lorena (1989)
Saco	Brasil	Quintela et al. (2000)
Avon	Austrália	Darvas (1971)
Woronora	Austrália	Darvas (1971)
Castelleto-Nerv. Canal	Itália	Magalhães e Lorena (1989)
Cimia	Itália	Lux e Hinchliff (1985)
Kizilcapinar	Turquia	Yildiz (1996)
Sarioglan	Turquia	Yildiz (1996)
Belia	Zaire	Magalhães e Lorena (1989)
Dungo	Angola	Magalhães e Lorena (1989)
Estancia	Venezuela	Magalhães e Lorena (1989)
Canal Infulene	Moçambique	Magalhães e Lorena (1989)
Barragem María Cristina	Espanha	Pageet al. (2007)
NavetPumpedStorage	Trindade & Tobago	Phelps (1974)
Ohau C Canal	Nova Zelândia	Walsh (1980)
SkeltonGrange Canal	Inglaterra	Magalhães e Lorena (1989)

2.3.3. GEOMETRIAS DO DESCARREGADOR EM PLANTA E DA CRISTA DA SOLEIRA

Como já foi referido, os descarregadores com soleira em labirinto podem apresentar essencialmente três formas, triangular (Fig. 2.12), trapezoidal (Fig. 2.13) ou retangular, para além de um quarto caso - o dos descarregadores em plano (Fig. 2.8) - que pode ser considerado um caso particular dos descarregadores com soleira em labirinto.



Figura 2.12- Descarregador com soleira em labirinto de forma triangular(apo.sdsu.edu/cive530_lecture_09.html).



Figura 2.13– Descarregador com soleira em labirinto de forma trapezoidal - barragem de Sta. Justa (www.tpfplanege.pt).

As principais dimensões de um descarregador com soleira em labirinto são apresentadas na figura 2.14 e descritas a seguir.

- Q – caudal afluente;
- W – Largura do canal;
- w – largura de um módulo;
- p – altura do descarregador;
- a – metade da largura da parede frontal (nula no caso de descarregadores de forma triangular);
- b – comprimento do descarregador, na direção do escoamento;
- c – desenvolvimento da parede lateral do descarregador;
- α – ângulo que as paredes laterais fazem com a direção do escoamento;
- H – carga total acima da crista do descarregador;
- h – carga hidráulica (altura de água) acima da crista do descarregador;
- V – velocidade média de aproximação ao descarregador;
- g – aceleração da gravidade.

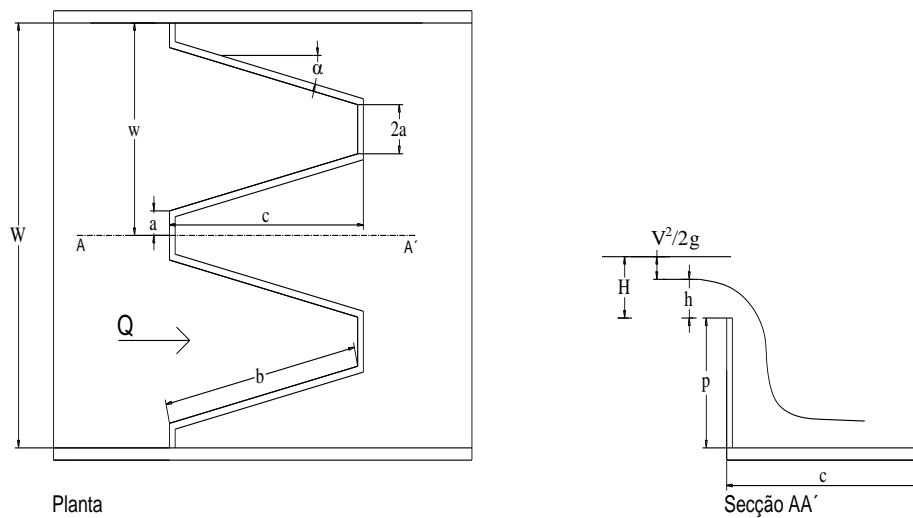


Figura 2.14–Dimensões de um descarregador com soleira em labirinto.

As cristas das soleiras dos descarregadores podem assumir várias formas, sendo que as mais usuais são as que estão ilustradas na figura 2.15: em topo direito, em bisel, quarto de circunferência, meia lua, tipo normal, ou tipo WES (*Waterways Experiment Station*).

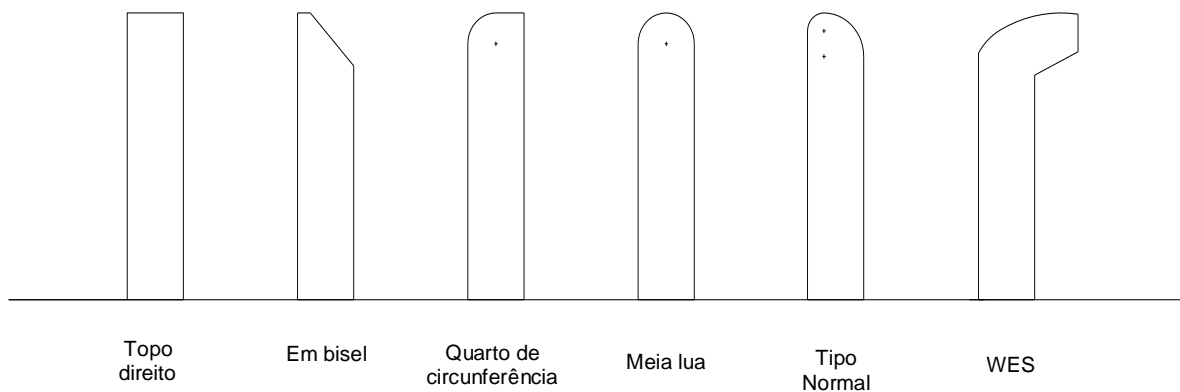


Figura 2.15–Diferentes formas das soleiras de um descarregador com soleira em labirinto.

2.3.3.1. Crista de soleira em topo plano e em bisel

A lei de vazão de um descarregador linear é definida por:

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L h^{1,5}, \quad (2.1)$$

em que L é largura do descarregador em metros, h representa a carga hidráulica, g é a aceleração da gravidade em m/s^2 e C_d é dado pelo coeficiente de Rehbok (Falvey, 2003), o qual pode ser calculado por:

$$C_d = 0,605 + 0,08 \frac{h}{p} + \frac{1}{h(mm)}, \quad (2.2)$$

2.3.3.2. Crista de soleira em quarto de circunferência

Foram efetuados ensaios em modelo, de descarregador com soleira de perfil em quarto de circunferência por Tullis (1995), citado por Falvey (2003). Através da equação (2.1) foram obtidos os valores do coeficiente de vazão patentes no gráfico da figura 2.16. A curva apresentada é para um raio, r , igual a $1/12$ da altura do descarregador, p , e a espessura do descarregador, e , é $1/6$ da sua altura.

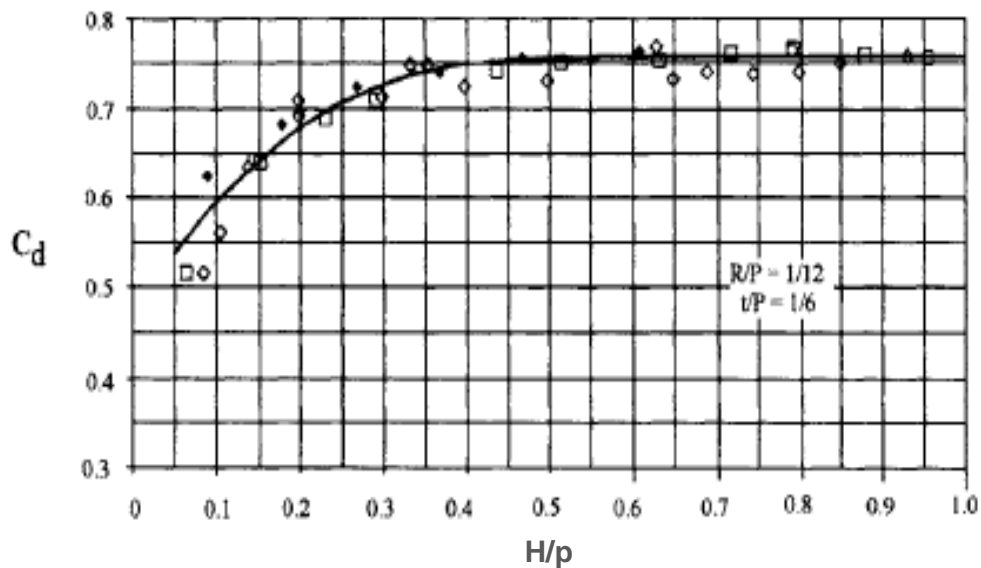


Figura 2.16—Coeficiente de vazão para um descarregador de soleira com perfil em quarto de circunferência, Tullis (1995) (adaptado de Falvey, 2003).

2.3.3.3. Crista de soleira em meia lua

O coeficiente de vazão para os descarregadores com soleira com perfil em meia lua é influenciado pelo escoamento sobre a soleira. São considerados quatro estados: sob pressão, atmosférico, com cavidade e sub-atmosférico (Fig. 2.17).

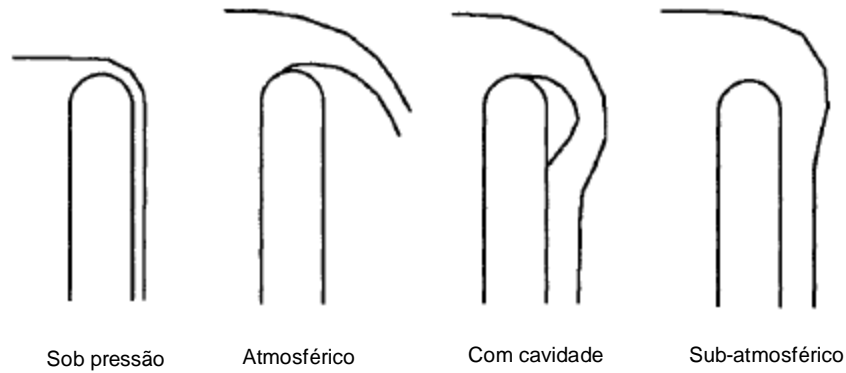


Figura 2.17–Condições de escoamento em soleiras em meia lua (adaptado de Falvey, 2003).

O coeficiente β_p define matematicamente estas condições:

$$\beta_p = \frac{P_c / \gamma}{Y_0}, \quad (2.3)$$

em que P_c é a pressão na soleira, Y_0 é a altura de água sobre a soleira e γ o peso específico da água.

Se $\beta_p > 0$, o escoamento ocorre sob pressão, se $\beta_p = 0$, o escoamento é atmosférico, e se $\beta_p < 0$, o escoamento é com cavidade ou sub-atmosférico.

O escoamento sob pressão é análogo aquele que se pode observar numa soleira tipo normal com uma carga total, H , menor que o H de projeto, a pressão em toda a soleira é positiva (maior que a pressão atmosférica). À medida que o H aumenta, é atingido um ponto em que a pressão na soleira passa a ser atmosférica.

Por outro lado, o escoamento em pressão atmosférica é análogo ao escoamento numa soleira tipo normal com o H de projeto. Para alturas H maiores, a pressão na soleira torna-se sub-atmosférica. Se a superfície livre de jusante puder ser arejada, a pressão na soleira passa a ser atmosférica, resultando num jato livre separado da soleira. Todavia, se a superfície de jusante não puder ser arejada, então instala-se o escoamento em pressão sub-atmosférica, fazendo com que o caudal escorra pela parte jusante do muro do descarregador. Entre estes dois casos extremos, poderá formar-se uma bolsa ou cavidade de ar, que caracteriza o escoamento com cavidade. Este é um escoamento geralmente instável, isto é, dependendo da altura de água do escoamento, o escoamento em cavidade poderá alternar entre os estados atmosférico e sub-atmosférico.

O coeficiente de vazão dado pela equação (2.4), será função do raio de curvatura do perfil da soleira, r , da altura do descarregador, p , e da altura total sobre a soleira, H :

$$C_d = f\left(\frac{H}{r}, \frac{H}{p}\right), \quad (2.4)$$

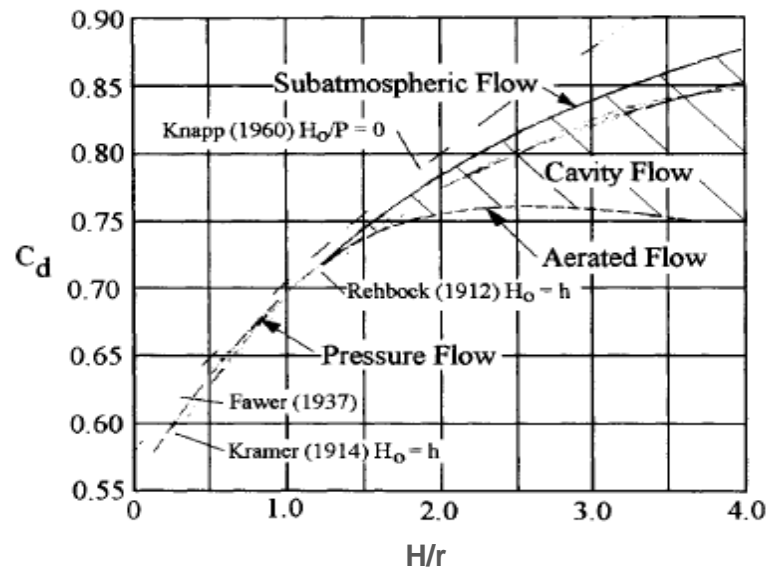


Figura 2.18—Coeficiente de vazão para um descarregador de soleira com perfil em meia lua, por Rouvé e Indlekofer (1974), citados por Falvey (2003) (adaptado de Falvey, 2003).

2.3.3.4. Crista de soleira com perfil tipo normal ou tipo WES

O perfil de tipo normal é definido pelo contorno inferior da superfície de um escoamento fictício, através de uma soleira em bisel. A área debaixo do escoamento poderá ser preenchida por betão sem afetar o escoamento sobre a soleira.

O *The United States Army Corps of Engineers*, citado por Falvey (2003), propõe a seguinte expressão para a curva da soleira:

$$Y = \frac{X^{1,85}}{2H^{0,85}}, \quad (2.5)$$

O *U.S. Bureau of Reclamation* (1974), citado por Falvey (2003), apresenta a seguinte equação para o cálculo do caudal neste tipo de soleiras:

$$Q = CLH^{3/2}, \quad (2.6)$$

em que,

$$C = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d, \quad (2.7)$$

em que C_d é o coeficiente de vazão obtido do gráfico da figura 2.19.

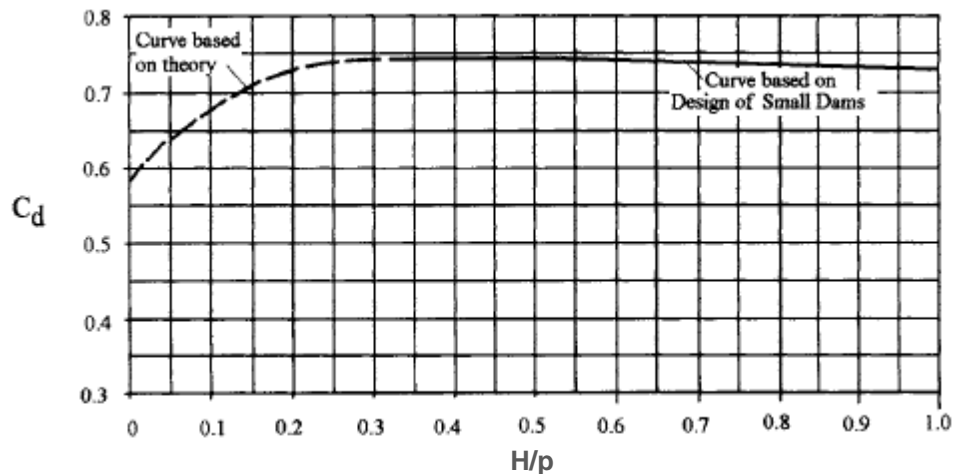


Figura 2.19– Coeficiente de vazão para um descarregador com soleira em perfil tipo normal, com base nas curvas de Hoffman (1974), citado por Falvey (2003) (adaptado de Falvey, 2003).

2.4.DIMENSIONAMENTO DE DESCARREGADORES COM SOLEIRA EM LABIRINTO

2.4.1.PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS E LIMITES DE APLICABILIDADE

Há vários parâmetros que deverão ser considerados na avaliação dos descarregadores com soleira em labirinto. Os mais recorrentemente citados pela literatura da especialidade, são o rácio de ampliação, l/w , o rácio de profundidade, H/p e o ângulo que a parede do descarregador faz com o sentido do escoamento, α .

Outros parâmetros, como o rácio w/p , não são considerados unanimemente como importantes, enquanto alguns consideram que deverá ser levado em conta, outros autores como Falvey (2003), consideram a sua importância como pouco significativa. Estes propõem como alternativa um rácio a que dão o nome de interferência, que “mede” a turbulência ao longo do comprimento da parede do descarregador, L_d/b , em que L_d é o comprimento de turbulência, e b a profundidade da parede do descarregador.

Segundo Falvey (2003), o número de módulos do descarregador, n , também não é um parâmetro significativo em termos de dimensionamento hidráulico.

Os parâmetros mais importantes são os seguintes:

- O rácio H/p , a carga, H , a dividir pela altura do descarregador, p . Como o coeficiente de vazão diminui com o aumento de H , os descarregadores com soleira em labirinto têm o seu campo de aplicação preferencial em casos com baixa carga, H . Lux (1989), citado por Falvey (2003), recomenda que o rácio máximo H/p esteja compreendido entre 0,45 e 0,50, o que não invalida que haja casos em que o dimensionamento do descarregador com soleira em labirinto ocorreu para rácios H/p de 1,0;
- w/p , é a largura de um módulo do descarregador a dividir pela sua altura. Taylor (1968), citado por Falvey (2003), recomenda que para minimizar o efeito de interferência na superfície livre, este parâmetro deva ser maior que 2. Já Lux (1989), citado por Falvey (2003), considera que w/p deverá ter um valor situado entre 2,0 e 2,5;
- l/w , ou rácio de ampliação, é o quociente entre o comprimento da crista de um módulo, l , e a largura desse mesmo módulo, w . Segundo Falvey (2003), a eficiência de um descarregador com soleira em labirinto diminui à medida que o rácio de ampliação excede o valor de 10, e

com um rácio menor que 2, devem ser consideradas outras alternativas ao descarregador com soleira em labirinto, tais como descarregadores curvos em planta, por exemplo;

- Eficácia, ε :

$$\varepsilon = \frac{C_d(\alpha)l/w}{C_d(90^\circ)}, \quad (2.8)$$

em que $C_d(\alpha)$ é o coeficiente de vazão de um descarregador com soleira em labirinto de ângulo α , e $C_d(90^\circ)$ é o coeficiente de vazão de um descarregador linear com a mesma largura. Apesar de ε ser essencialmente o quociente entre o caudal de um descarregador em labirinto e o caudal de um descarregador linear com a mesma largura, Q_L/Q_N de Taylor (1968), esta incorpora o rácio de ampliação e o efeito do ângulo α , tornando especialmente rápida a avaliação das alterações à geometria do descarregador durante o processo de dimensionamento (Fig.2.20).

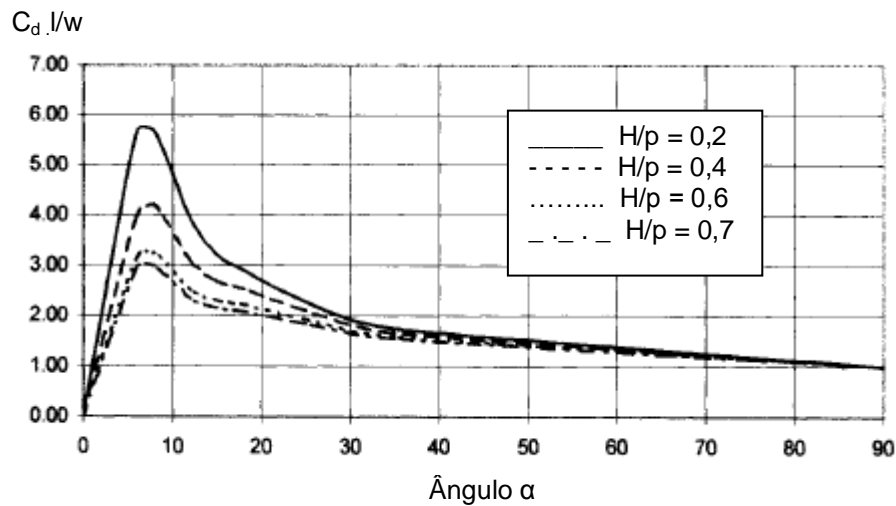


Figura 2.20–Eficácia, ε , em descarregadores de forma triangular (adaptado de Falvey, 2003)

A eficácia atinge um valor máximo para todos os H/p , para um ângulo α de cerca de 8° , o que corresponde a um l/w de 7,2.

Nos descarregadores de forma trapezoidal os efeitos são similares àqueles que se observam para os descarregadores triangulares, com a exceção de que a eficácia não se aproxima de zero à medida que o ângulo α tende para zero;

- Rácio do comprimento de interferência, L_d/b . Trata-se de um importante parâmetro a considerar na limitação dos efeitos da interferência na superfície livre. O comprimento de interferência ou de turbulência é dado pela seguinte equação:

$$L_d/h = 6,1e^{-0,052\alpha}, \quad (2.9)$$

O rácio do comprimento de interferência, deverá ser menor ou igual a 0,3, e pode ser expresso da seguinte forma:

$$L_d/b = h/b \cdot 6,1e^{-0,052\alpha} \leq 0,3, \quad (2.10)$$

2.4.2. CURVAS DE VAZÃO

As curvas de vazão disponíveis estão divididas em dois grupos: as que tiveram como modelo descarregadores triangulares e outro grupo que teve como modelo descarregadores trapezoidais.

Para o cálculo do coeficiente de vazão em descarregadores de forma triangular, usar-se-ão as curvas de Hay e Taylor (1970) - descarregadores triangulares, Lux e Hinchliff (1985) - descarregadores triangulares, e Tullis (1995).

No caso dos descarregadores trapezoidais, usar-se-ão as curvas de Hay e Taylor (1970) – descarregadores trapezoidais, Darvas (1971), Lux e Hinchliff (1985) – descarregadores trapezoidais e Magalhães e Lorena (1989).

2.4.2.1. Método de Hay e Taylor (1970)

Em 1970, Hay e Taylor realizaram um estudo com 24 modelos à escala, quase todos em descarregadores de forma triangular e alguns de forma trapezoidal e retangular. Estes modelos tinham duas configurações de perfil de crista: em bisel e meia-lua (Crookston, 2010). As experiências ocorreram para limites do parâmetro h/p de 0,05 a 0,55.

Dividindo o caudal de um descarregador com soleira em labirinto, pelo caudal de um descarregador linear com a mesma largura, estes autores obtiveram a grandeza adimensional Q_L/Q_N . O resultado é apresentado numa família de curvas representativas das suas características, dada por:

$$Q_L/Q_N = f(h/p, l), \quad (2.11)$$

em que Q_L é o caudal do descarregador com soleira em labirinto, Q_N , o caudal do descarregador linear, h , a carga hidráulica, p , a altura do descarregador, l , corresponde à opção entre descarregador com soleira em labirinto triangular ou trapezoidal (Fig. 2.21).

O parâmetro eficácia, ε , que avalia o benefício que o aumento do comprimento da soleira de um descarregador em labirinto aporta, em relação a um descarregador linear, é, para estes autores, definido da seguinte forma:

$$\varepsilon(\%) = \frac{Q_L/Q_N}{l/w} \times 100, \quad (2.12)$$

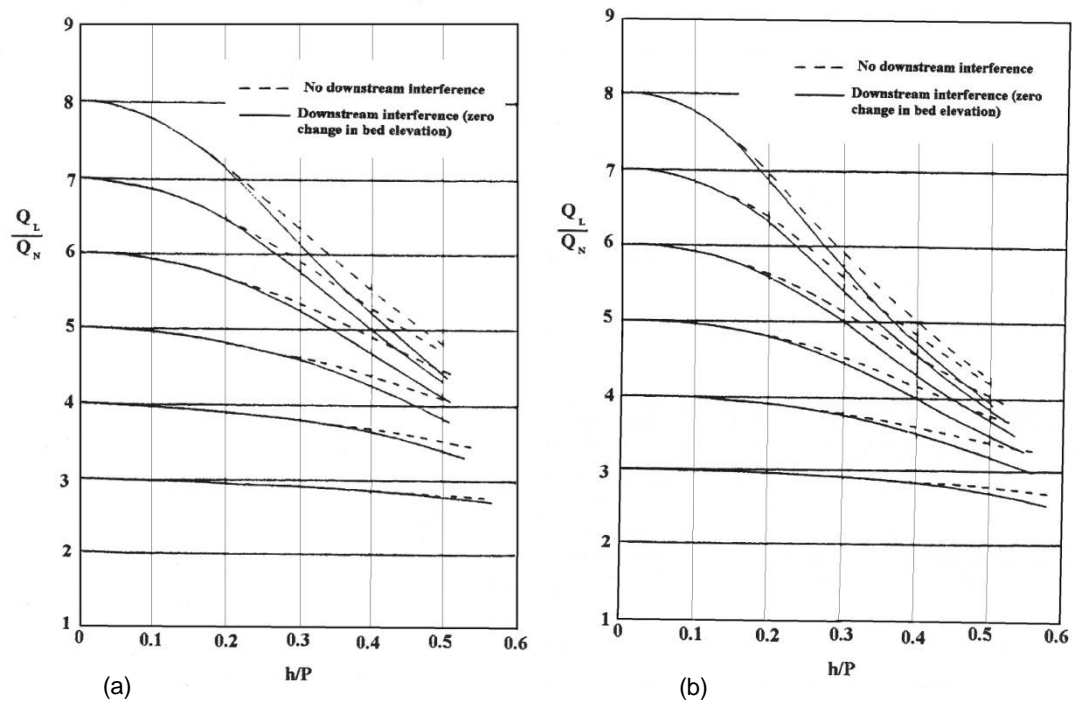


Figura 2.21– Curvas de vazão para descarregadores com soleira em labirinto de forma triangular (a) e forma trapezoidal (b). Em ambos os casos o perfil da crista é em bisel, segundo Hay e Taylor (1970) (Falvey, 2003).

2.4.2.2. Método de Darvas (1971)

O método de Darvas (1971) consiste na lei de vazão da equação (2.13) que permite obter o valor do coeficiente de vazão C_w , e do ábaco da figura 2.22.

$$C_w = \frac{Q_L}{W} H^{1,5}, \quad (2.13)$$

em função dos parâmetros l/w e h/p , que se baseou em ensaios obtidos nas seguintes condições:

- Soleira em labirinto com forma trapezoidal, assente em fundo horizontal e perfil da crista com forma em quarto de circunferência;
- Escoamento sobre a soleira não afogado;
- $1 \leq l/w \leq 8$
- $0,2 \leq H/p \leq 0,6$
- $\alpha/\alpha_{max} \geq 0,8$
- $w/p \geq 2$

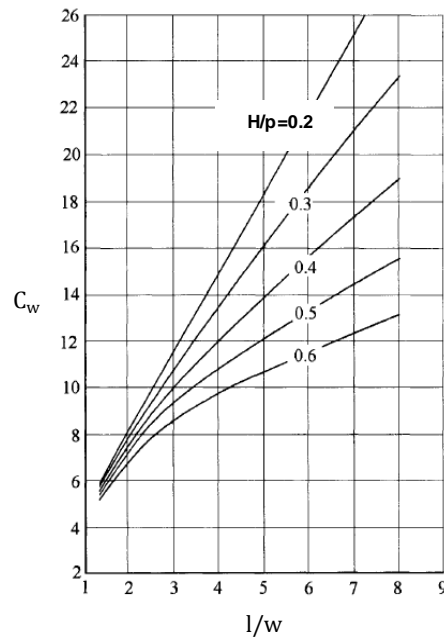


Figura 2.21– Curvas de Darvas (1971), obtidas para um descarregador com soleira em labirinto de forma trapezoidal e perfil de crista com a forma de um quarto de circunferência (adaptado de Falvey, 2003).

A partir do ábaco da figura 2.22, foi definido um outro (Fig. 2.23), através da transformação de unidades (Q_L (m^3/s)) e utilizando um coeficiente de vazão – μ_w – adimensional, isto é,

$$Q_L = \mu_w W \sqrt{2g} H^{1,5}, \quad (2.14)$$

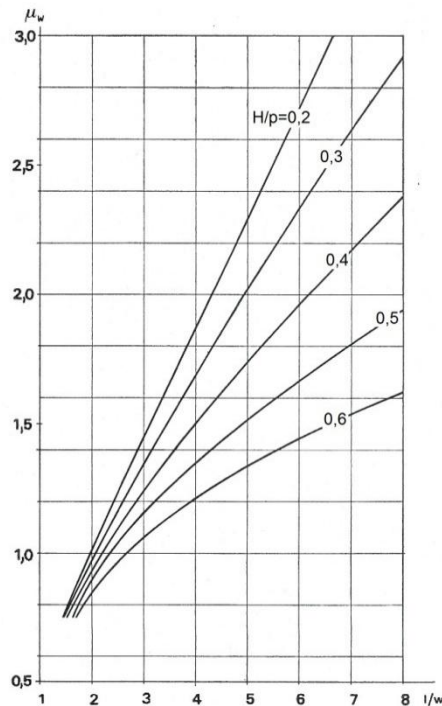


Figura 2.22– Curvas de Darvas alteradas por Magalhães (adaptado de Magalhães, 1983).

2.4.2.3. Método de Magalhães e Lorena (1989)

Tendo por base os trabalhos de Darvas (1971), Magalhães e Lorena (1989) realizaram um estudo experimental, do qual resultou um novo ábaco (Fig. 2.24) para a determinação do coeficiente de vazão para este tipo de soleiras, μ_w , tal que,

$$\mu_w = \frac{Q_L}{W\sqrt{2gH}^{1,5}}, \quad (2.15)$$

As condições de validade para os resultados obtidos neste estudo são as seguintes:

- Descarregadores com soleira em labirinto, com forma trapezoidal assente em fundo horizontal e perfil da crista tipo WES;
- $2,0 \leq l/w \leq 5,0$
- $0,1 \leq H/p \leq 1,0$
- $\alpha/\alpha_{max} \geq 0,8$
- $w/p \geq 2,5$

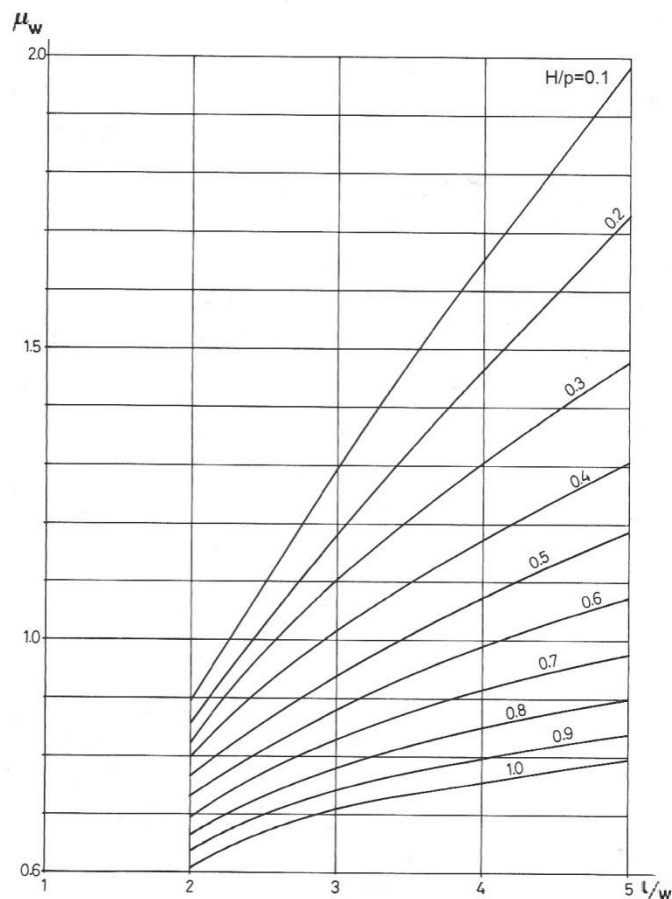


Figura 2.23— Ábaco para o cálculo do coeficiente de vazão, μ_w , de Magalhães e Lorena, adaptado de Magalhães e Lorena (1989).

Em comparação com o ábaco de Darvas (1971), o ábaco de Magalhães e Lorena (1989), para as condições enunciadas, permite obter um coeficiente de vazão μ_w mais próximo dos valores

observados nos estudos em modelos à escala, por eles efectuados no LNEC para diferentes barragens. O quadro da figura 2.25 é elucidativo: nas seis barragens estudadas com modelos à escala - Harrezza, Keddara, Dungo, S. Domingos, Alijó e Gema – a diferença no coeficiente μ_w obtido do ábaco de Darvas, com μ_w medido nos ensaios, é de 16%, enquanto que a diferença para o μ_w obtido do ábaco de Magalhães e Lorena (1989), não chega a 5%.

Quadro2.24– Comparação entre os valores de μ_w obtidos nos ensaios em modelos hidráulicos, com os valores obtidos dos ábacos de Darvas (1971) e de Magalhães e Lorena (1989) (adaptado de Magalhães e Lorena, 1989).

Descarregador(barragem)	l/w	p (m)	H (m)	H/p	μ_w		
					Modelo hidráulico	Darvas	Magalhães e Lorena
Harrezza	2,94	3,5	0,70	0,2	1,19	1,43	1,17
			1,40	0,4	1,06	1,23	1,00
Keddara	2,95	3,5	0,70	0,2	0,96	1,43	1,17
			1,40	0,4	0,87	1,23	1,00
			2,10	0,6	0,80	1,05	0,87
Dungo	2,94	3,5	0,70	0,2	1,16	1,43	1,17
			1,40	0,4	1,03	1,23	1,00
			2,10	0,6	0,91	1,05	0,87
S. Domingos	3,00	3,0	0,60	0,2	1,07	1,45	1,17
			1,20	0,4	1,02	1,24	1,02
			1,80	0,6	0,93	1,06	0,88
Alijó	2,42	2,5	0,50	0,2	1,06	1,20	1,00
			1,00	0,4	1,03	1,07	0,90
Gema	2,40	2,5	0,50	0,2	0,97	1,20	1,00
			1,00	0,4	0,94	1,07	0,90

2.4.2.4.Método deLux e Hinchliff (1985)

Lux e Hinchliff (1985) propuseram um novo coeficiente de vazão baseado na carga total do escoamento sobre a crista, H .

A equação que permite calcular o caudal para um módulo de um descarregador com soleira em labirinto, é o seguinte:

$$Q_C = C_x \frac{w/p}{w/(p+k)} wH\sqrt{gH}, \quad (2.16)$$

em que C_x é o coeficiente de vazão e $k=0,18$ para descarregadores com forma triangular ou $k=0,10$ para descarregadores com forma trapezoidal.

Para obter o caudal para a totalidade do descarregador, Q_L , basta multiplicar a equação (2.16) pelo número de módulos do descarregador, n :

$$Q_L = nQ_C, \quad (2.17)$$

Na figura 2.26 apresentam-se os ábacos de Lux e Hintchliff (1985), para o cálculo do coeficiente de vazão, C_x , em descarregadores com soleira em labirinto de forma triangular (a) ou trapezoidal (b).

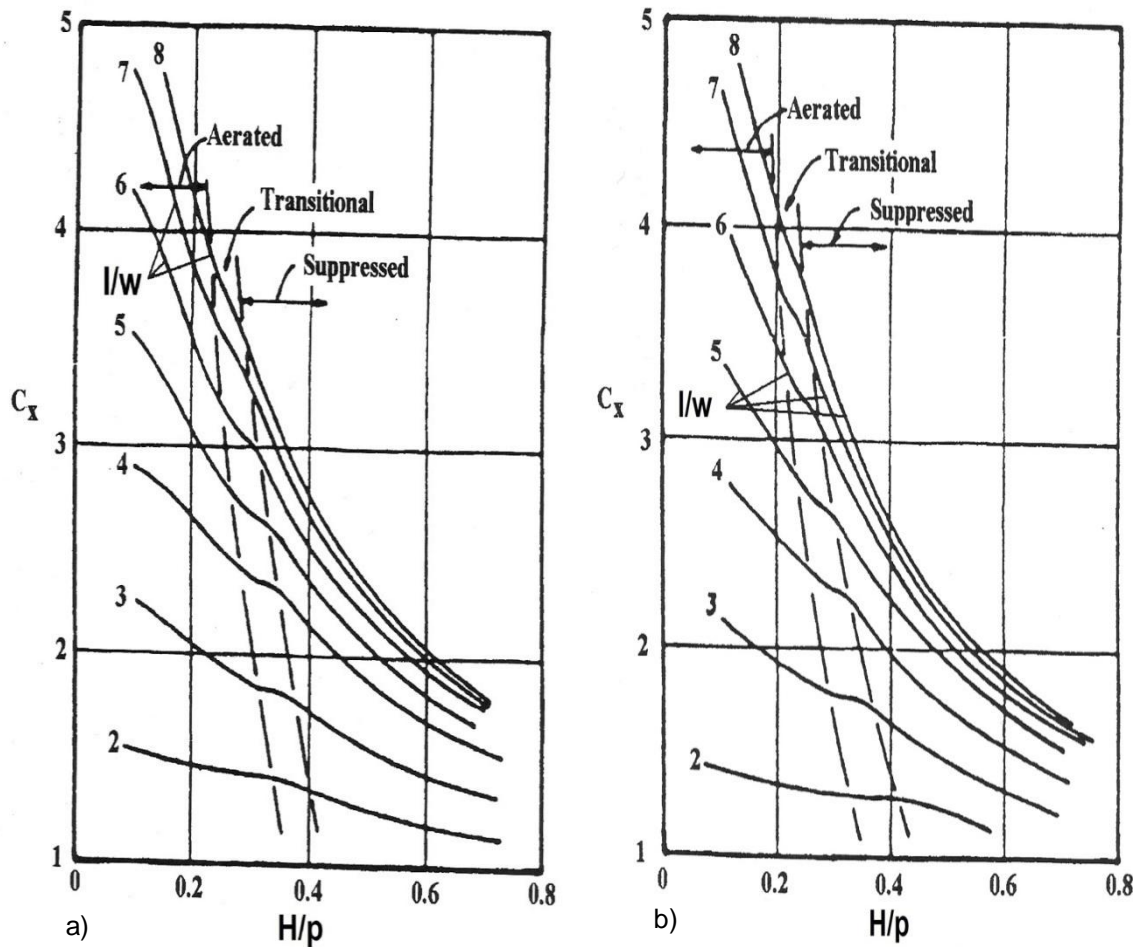


Figura 2.24— Ábaco de Lux e Hintchliiff(1985), para cálculo do coeficiente de vazão, C_x , em descarregadores com soleira em labirinto de forma triangular (a), ou trapezoidal (b) (adaptado de Falvey, 2003).

2.4.2.5. Método de Tullis (1995)

Tullis (1995), ensaiaram modelos hidráulicos num canal em condições similares às de Taylor (1968), propuseram um coeficiente de vazão que usa a altura total sobre a crista, H . A equação para a determinação do caudal, Q_L , para descarregadores de soleira em labirinto de forma triangular e crista com forma de quarto de circunferência, é a seguinte:

$$Q_L = C_T L^{\frac{2}{3}} \sqrt{2g} H^{1.5}, \quad (2.18)$$

em que C_T é o coeficiente de vazão.

Na figura 2.26 apresenta-se o ábaco proposto por Tullis (1995) para cálculo do coeficiente de vazão, C_T , em função de H/p e do ângulo α que as paredes do descarregador fazem com o sentido do escoamento.

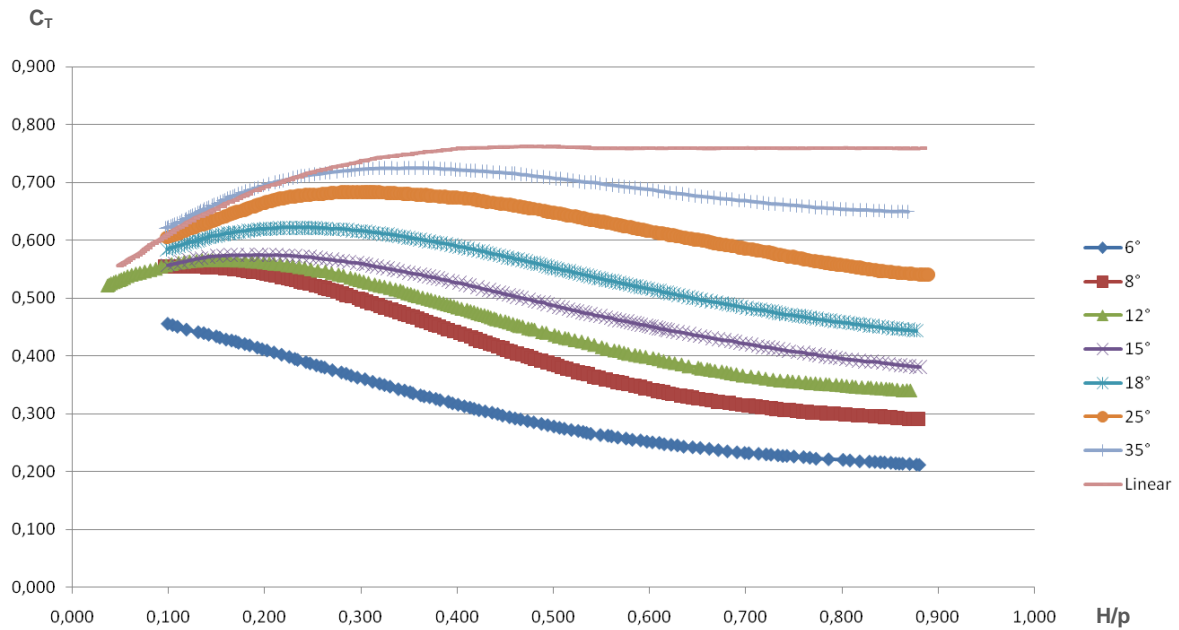


Figura 2.25– Ábaco proposto por Tullis(1955) para cálculo do coeficiente de vazão, C_T , em função de H/p e do ângulo α que as paredes do descarregador fazem com o sentido do escoamento (adaptado de Falvey, 2003).

No quadro 2.4 apresenta-se um resumo dos métodos de dimensionamento que serão utilizados no desenvolvimento da ferramenta de cálculo em Excel, bem como das respectivas condições de validade.

Quadro 2.5 – Quadro resumo dos métodos de dimensionamento.

Autores do estudo	Geometria da crista	Forma do descarregador
Hay e Taylor (1970)	Em bisel	Triangular Trapezoidal
Darvas (1971)	Quarto de circunferência	Trapezoidal
Magalhães e Lorena (1989)	WES	Trapezoidal
Lux e Hinchliff (1985)	Quarto de circunferência	Triangular Trapezoidal
Tullis (1985)	Quarto de circunferência	Trapezoidal

3

FERRAMENTA DE CÁLCULO

Neste capítulo apresentar-se-á o modelo proposto para o dimensionamento dos descarregadores de soleira em labirinto, através de cálculo automático, tendo por base os elementos e os princípios explanados no capítulo anterior.

3.1.OS MÉTODOS DE CÁLCULO

Os métodos a usar terão por base as leis de vazão dos diferentes autores, que foram descritas no capítulo 2:

- Para os descarregadores de forma triangular, o método de Hay e Taylor (1970), Lux e Hinchliff (1985) e Tullis (1995);
- Para os descarregadores de forma trapezoidal, o método de Hay e Taylor (1970), Lux e Hinchliff (1985), Darvas (1971) e Magalhães e Lorena (1989).

As curvas estão disponíveis, graficamente, em papel, pelo que foi necessário um trabalho prévio de digitalização e parametrização, para traduzir a informação em pares de pontos (x, y) .

Após a digitalização dos gráficos, utilizou-se um software adequado (*Get Graph Data Digitizer*) para, manualmente, fazer o levantamento de pontos da curva que eram registados pelas suas coordenadas x e y . Garantiu-se um intervalo entre pontos, suficientemente pequeno, de tal modo que o intervalo entre estes, no eixo dos xx , não fosse superior a 0,01, 0,02. Para cada curva do mesmo gráfico fez-se corresponder um par de colunas preenchidos pelos pares de valores (x, y) .

A etapa seguinte consistiu em aproximar cada uma das curvas obtidas por uma função $Y = f(x)$. Testadas várias funções logarítmicas e polinomiais de vários graus, optou-se em cada caso pela que apresentou o coeficiente de correlação, R^2 , mais próximo de 1,0.

Assim, para além da folha de cálculo, “*Dimensionamento de descarregadores em labirinto*”, o ficheiro contará com mais cinco folhas de cálculo auxiliares, correspondentes a cada um dos métodos, que permitem o cálculo do coeficiente de vazão necessário ao cálculo do caudal (Fig. 3.1).

A folha de cálculo, “*Dimensionamento de descarregadores em labirinto*”, contém quatro tabelas diferentes que seguidamente se descrevem:

- **Tabela 1 – Dados de Entrada** (Figs. 3.1 e 3.2). É a tabela que o utilizador tem que preencher com os seguintes dados: nível de máxima cheia (NMC), cota da crista do descarregador (CC), cota do pavimento do descarregador (C_0), largura do descarregador (W), número de módulos (n), comprimento do segmento perpendicular ao escoamento (a), que em descarregadores de forma triangular será, naturalmente, nulo, e o parâmetro l/w , em que l é o comprimento de soleira de um módulo e w a largura desse mesmo módulo.

1. DADOS DE ENTRADA				
Nº	PROJECTO	NMC (Nível de máxima cheia)	CC (Cota da Crista)	C ₀ (Cota do pavimento do descarregador)
1	Exemplo 1	100,00	99,00	95,00
2	Exemplo 2	100,00	99,00	96,00

Figura 3.1– Tabela 1: Dados de Entrada (pomenor a)).

C ₀ (Cota do pavimento do descarregador)	W (m)	n	a (m)	Parâmetro l/w
95,00	40,00	3	0,00	5,00
96,00	25,00	2	1,00	5,00

Figura 3.2– Tabela 1: Dados de Entrada (pomenor b))

- **Tabela 2 – Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros** (Figs. 3.3 e 3.4). Este quadro é preenchido automaticamente de acordo com os dados fornecidos no 1º quadro com a seguinte informação: indicação da forma do descarregador, se é triangular ou trapezoidal; comprimento da parede inclinada do descarregador (b); comprimento da soleira de um módulo (l); comprimento total de soleira do descarregador (L); ângulo α , que a parede inclinada faz com o sentido de escoamento; altura do descarregador (p); altura total de água sobre a crista da soleira (H); rácio H/p ; largura de um módulo do descarregador (w); rácio w/p ; comprimento de interferência (l_a), e finalmente, rácio l_a/b .

2. DIMENSÕES DO DESCARREGADOR E OUTROS PARÂMETROS					
Formato	b (m)	l (m) =2b+4a	L (m) =nl	α (°)	p (m)
TRIANGULAR	33,33	66,67	200,00	11,54	4,00
TRAPEZOIDAL	29,25	62,50	125,00	8,40	3,00

Figura 3.3– Tabela 2: Dimensões do Descarregador e Outros Rácios (pomenor a)).

p (m)	H (m)	H/p	w (m) =W/n	w/p	I_d (comprimento de interferência)	I_d/b
4,00	1,00	0,25	13,33	3,33	3,35	0,10
3,00	1,00	0,33	12,50	4,17	3,94	0,13

Figura 3.4– Tabela 2: Dimensões do Descarregador e Outros Rácios (pomenor b)).

- **Tabela 3 – Resultados**(Fig. 3.5). Nesta tabela aparecem os resultados do cálculo automático do caudal, por todos os métodos atrás referidos, nomeadamente: Hay e Taylor (1970), Lux e Hinchliff (1985), Tullis (1995), Darvas (1971) e Magalhães e Lorena (1989). Como o método de Hay e Taylor, usa não a carga total, H , mas sim a carga hidráulica, h , é necessário arbitrar uma velocidade inicial e ajustá-la iterativamente, de tal modo que a diferença entre esta e a velocidade calculada através do caudal, seja nula.

LUX E HINCHLIFF (descarregadores triangulares)			LUX E HINCHLIFF (descarregadores trapezoidais)		
$2 \leq l/w \leq 8$ e $0,07 \leq H/p \leq 0,76$?	C_x	Q_L (m ³ /s)	$3 \leq l/w \leq 8$ e $0,07 \leq H/p \leq 0,76$?	C_x	Q_L (m ³ /s)
OK	2,853	373,58	Válido apenas para desc. trapezoidais		
Válido apenas para desc. triangulares			OK	2,762	361,65

Figura 3.5– Tabela 3: Resultados (pomenor).

- **Tabela 4 – Quadro Resumo dos Resultados** (Fig. 3.6) é um quadro que aparece ao lado do 1º quadro – Dados de Entrada – que sintetiza e resume todos os valores de caudal obtidos na tabela 3.

4. QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS (Q_L em m ³ /s)							
FORMATO	Hay e Taylor (triangular)	Lux e Hinchliff (triangular)	Tullis	Hay e Taylor (trapezoidal)	Lux e Hinchliff (trapezoidal)	Darvas	Magalhães e Lorena
TRIANGULAR	292,99	373,58	322,51				
TRAPEZOIDAL				289,00	361,65	381,91	285,26

Figura 3.6– Tabela 4: Quadro Resumo dos Resultados.

Como resultado final, pretende-se obter as várias soluções de diversos autores, de modo a que o utilizador das tabelas de cálculo possa ter diferentes perspetivas e poder optar pela mais conservadora em termos de segurança, ou a que se apresenta mais favorável economicamente, ou poder fazer uma análise ponderada em que todos estes fatores tenham o seu peso numa solução otimizada.

A sequência das operações efetuadas pelas folhas de cálculo está esquematizada no fluxograma da figura 3.7.

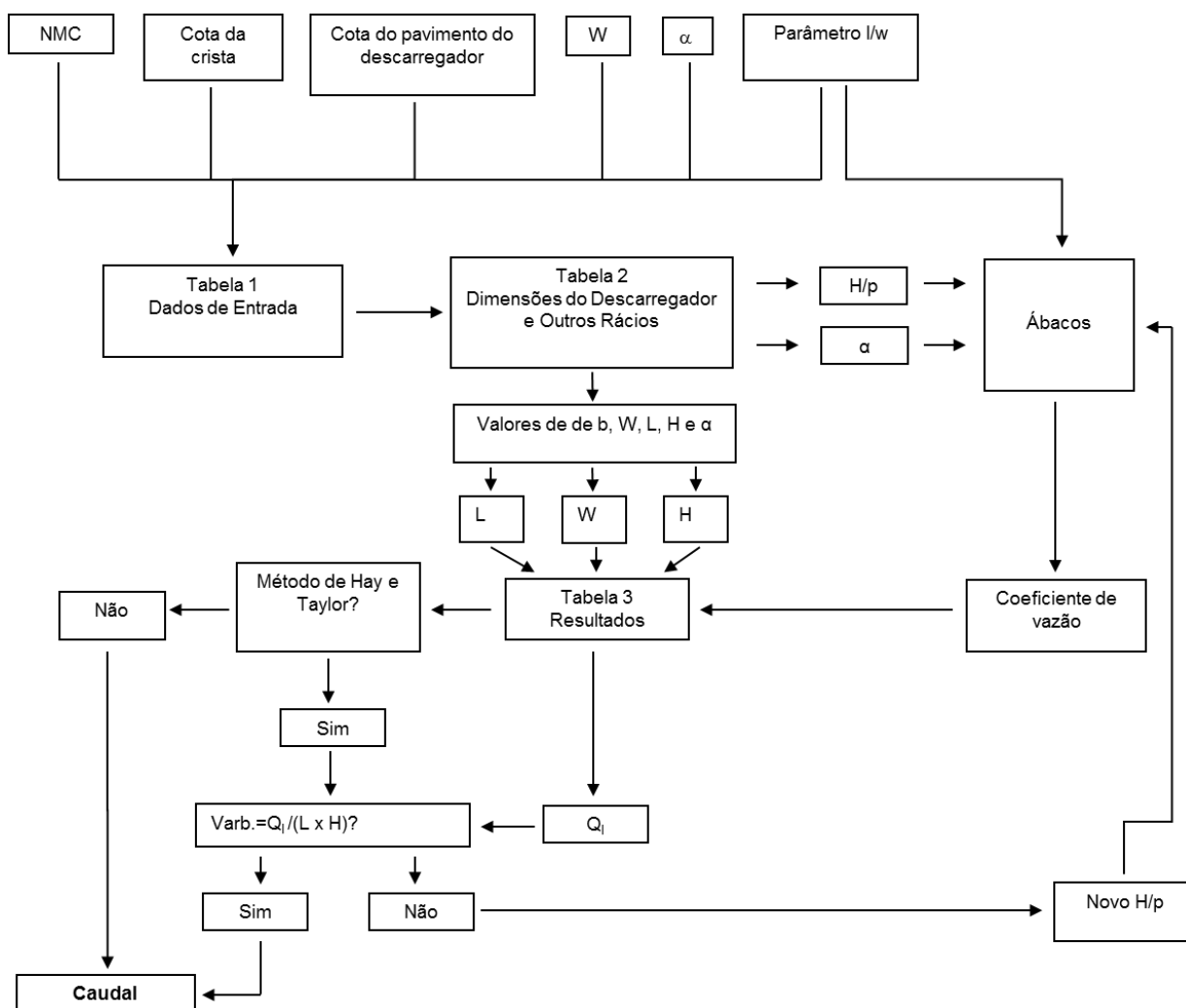


Figura 3.7– Fluxograma do processo adotado na ferramenta de cálculo automático do caudal.

3.1.1.MÉTODO DE HAY E TAYLOR (1970)

A folha de cálculo correspondente a este método está dividida em duas partes, a primeira para descarregadores de forma triangular e a segunda para descarregadores de forma trapezoidal, baseadas nas curvas dos gráficos respetivos (Fig.2.21). Como o cálculo da vazão de um descarregador linear, Q_N , é conhecido, sabendo o valor de Q_L/Q_N , obtém-se o valor de Q_L .

O rácio Q_L/Q_N , quando h/p tende para 0 tenderá a ser igual à razão entre o comprimento das respetivas soleiras, isto é, se $h/p \rightarrow 0$ então $Q_L / Q_N = L/W$, uma vez que deixam de se fazer sentir outros efeitos que influem no escoamento. Deste modo, quando $h/p=0$, o conjunto de valores correspondentes

Q_L/Q_N para cada uma das curvas, passa assim, a ser designado por $(Q_L/Q_N)_0$. A partir do valor L/W , que decorre diretamente do preenchimento dos “Dados de Entrada”, facilmente se situará a curva entre uma curva superior e outra inferior, cuja interpolação no valor de h/p dará o valor pretendido de Q_L/Q_N (Hager, 2015). Na figura 3.8 encontra-se esquematizado o fluxograma de cálculo deste método, explicando como, depois de obter o valor L/W , a curva do descarregador que está a ser calculado, estará contida entre as curvas $(Q_L/Q_N)_0$ com valores inferior e superior. A interseção entre esta curva e h/p , dará o valor Q_L/Q_N pretendido.

Este método não usa a carga total H , mas sim a carga hidráulica, $h = H - V^2/2g$, valor que tem de ser encontrado iterativamente, arbitrando um valor inicial da velocidade (V), que será ajustado até que este iguale o valor de V_0 calculado pelo quociente entre Q_L e a secção (neste caso $L.H$).

No quadro 3.1 estão listadas as funções polinomiais que aproximam as curvas dos gráficos de Hay e Taylor (1970).

Quadro 3.1 – Funções de ajuste às curvas do ábaco de Hay e Taylor (1970).

Forma	Q_L/Q_N	Função: ax^3+bx^2+cx+d				Coef. Correlação R^2
		a	b	c	d	
Triangular	3	-0,710	-0,102	-0,162	2,971	0,995
	4	-4,631	1,207	-0,649	3,992	0,999
	5	-1,514	-3,688	-0,105	4,988	0,999
	6	8,472	-13,620	0,994	5,949	0,999
	7	20,790	-23,910	1,527	6,921	0,999
	8	36,740	-35,100	1,335	7,961	0,999
Trapezoidal	3	-2,675	0,612	-0,206	3,013	0,998
	4	-0,100	-3,713	0,389	3,966	0,999
	5	8,390	-12,700	1,379	4,945	0,999
	6	21,370	-23,750	2,067	5,937	0,999
	7	34,910	-33,780	1,980	6,955	0,999
	8	51,950	-43,940	0,991	8,015	0,999

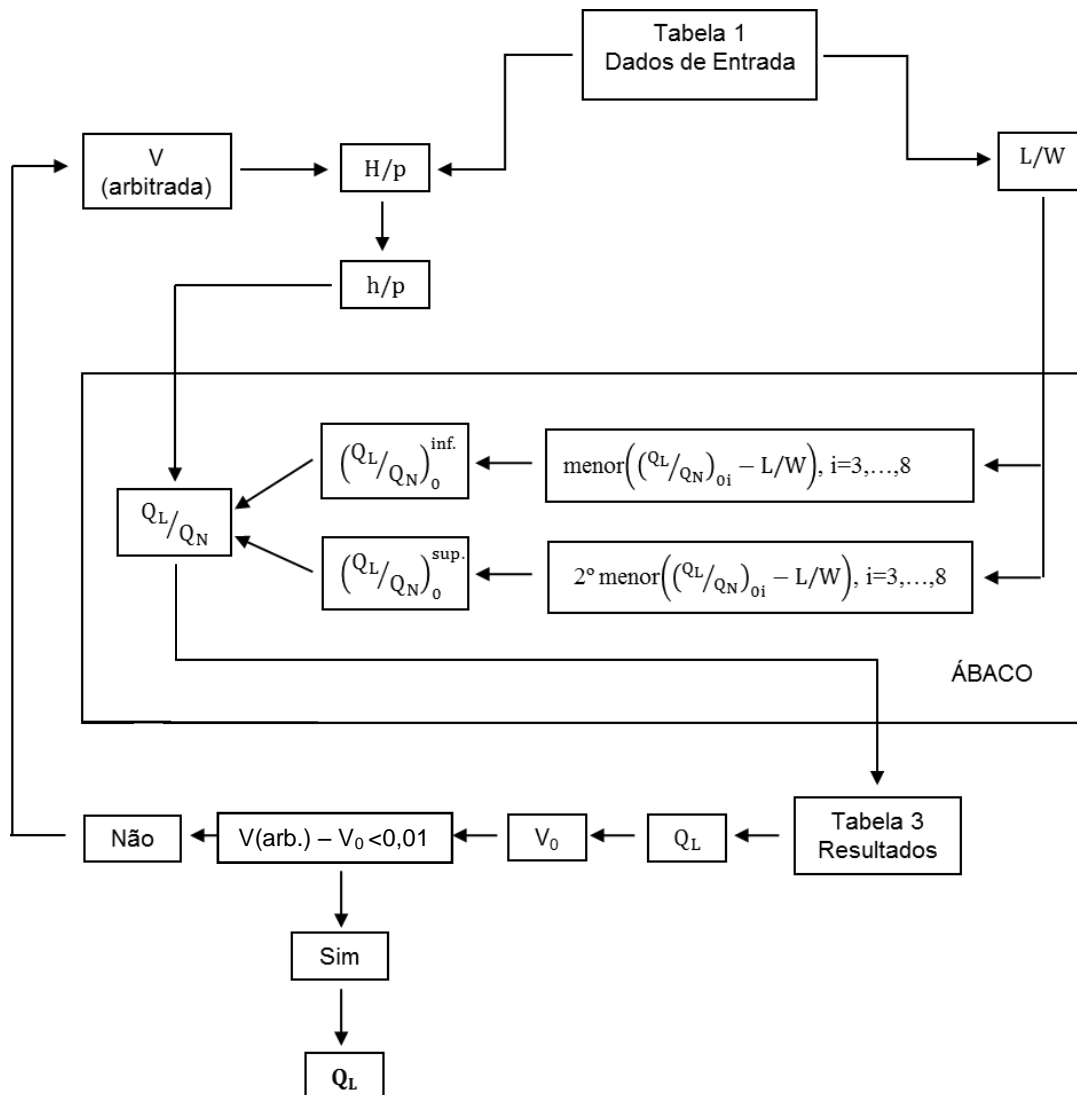


Figura 3.8– Fluxograma do processo de cálculo do caudal Q_L pelo método de Hay e Taylor (1970).

3.1.2.MÉTODO DE DARVAS (1971)

O método de Darvas (1971) aplica-se a descarregadores de forma trapezoidal. O ábaco respetivo (Fig. 2.21) permite obter o coeficiente de vazão μ_w , em função de l/w , e para a família de curvas definidas para diferentes valores de H/p .

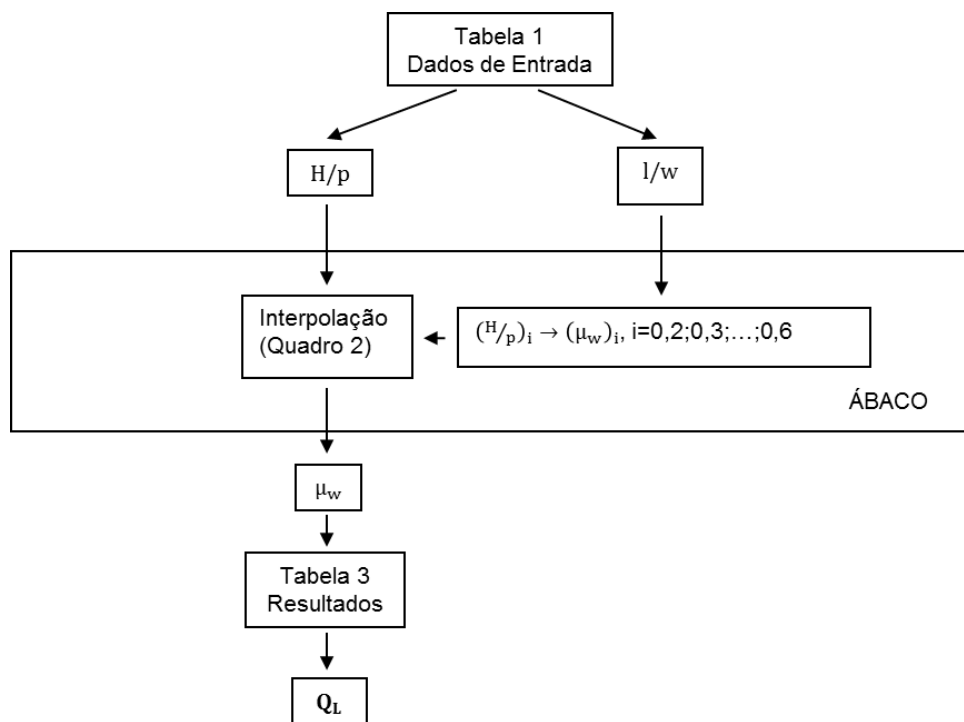
No quadro 3.2 apresentam-se, para cada valor de H/p , as funções polinomiais que ajustam as curvas do ábaco.

Como esquematizado no fluxograma da figura 3.10, obtidas as funções polinomiais que ajustam os conjuntos de pontos que formam as curvas do ábaco (Quadro 3.2), para o valor de l/w calcula-se o valor de μ_w para cada uma das curvas $H/p = i$, com $i=0,2, 0,3, \dots, 0,6$. No passo seguinte faz-se corresponder o valor de cada μ_w à respetiva curva H/p , interpolando entre estes os valores de H/p arredondados às centésimas, a que correspondem valores de μ_w de igual modo interpolados.

Na folha de cálculo principal (“Dimensionamento”), na tabela 3 (“Resultados”), na coluna dos μ_w , será então procurado o valor tal que corresponde ao valor H/p arredondado à centésima, que por sua vez será usado na lei de vazão (equação 2.14), resultando no valor pretendido de Q_L .

Quadro 3.2 – Funções de ajuste às curvas do ábaco de Darvas(1971).

Forma	H/p	Função: ax^2+bx+c			Coef. de Correlação R^2
		a	b	c	
Trapezoidal	0,2	-0,001	0,442	0,127	0,999
	0,3	-0,009	0,414	0,172	1,000
	0,4	-0,011	0,356	0,260	0,999
	0,5	-0,014	0,310	0,329	0,997
	0,6	-0,013	0,256	0,391	0,997

Figura 3.9– Fluxograma do processo de cálculo do caudal Q_L pelo método de Darvas (1971).

3.1.3. MÉTODO DE MAGALHÃES E LORENA (1989)

O método de Magalhães e Lorena (1989), tem como base a mesma lei de vazão do método de Darvas (1971), diferenciando-se deste pelo ábaco apresentado, baseado nas experiências em modelos físicos levadas a cabo por estes autores. O esquema de funcionamento da folha de cálculo é essencialmente o mesmo. As funções que definem as curvas do ábaco fazem parte do quadro 3.3.

No gráfico de Magalhães e Lorena (1989), apresentado na figura 2.21, o eixo das abcissas é o parâmetro l/w , que intersectado com as curvas $h/p=i$, com $i=0,1;0,2;\dots;1,0$, acima descritas, define o ponto das ordenadas que é o coeficiente de vazão pretendido, μ_w .

Quadro 3.3 – Funções de ajuste às curvas do ábaco de Magalhães e Lorena (1989).

Forma	H/p	Função: ax^2+bx+c			Coef. de Correlação R^2
		a	b	c	
Trapezoidal	0,1	-0,018	0,491	-0,015	0,999
	0,2	-0,014	0,390	0,139	0,999
	0,3	-0,024	0,382	0,171	0,999
	0,4	-0,019	0,303	0,281	0,999
	0,5	-0,014	0,236	0,354	0,999
	0,6	-0,016	0,224	0,350	0,999
	0,7	-0,017	0,212	0,348	0,999
	0,8	-0,015	0,183	0,368	0,998
	0,9	-0,015	0,168	0,370	0,996
	1,0	-0,014	0,154	0,367	0,992

3.1.4. MÉTODO DE LUX E HINCHLIFF (1985)

O método de Lux e Hinchliff (1985) propõe dois ábacos, um para descarregadores com forma triangular e outro para descarregadores com forma trapezoidal, estando a folha de cálculo dividida horizontalmente, para cada uma destas opções. O esquema de funcionamento não difere substancialmente dos anteriores: o eixo das abcissas do ábaco é H/p , as curvas são os valores de $(l/w)_i$ com $i=2,3,\dots,8$. A intersecção do valor H/p com a curva l/w respectiva, define o valor do coeficiente de vazão, C_X .

No quadro 3.4 apresentam-se as funções polinomiais que aproximam as curvas dos gráficos (Fig. 2.24).

3.1.5. MÉTODO DE TULLIS (1985)

Tullis (1985) propuseram um método que difere de todos os outros porque o coeficiente de vazão, C_T , é função de H/p e do ângulo α , formado entre a parede do descarregador e o sentido de escoamento.

As curvas do gráfico de Tullis (1985), apresentadas na figura 2.25, correspondentes aos ângulos de 6° , 8° , 12° , 15° , 18° , 25° e 35° , foram aproximadas por polinómios que se apresentam no quadro 3.5.

O processo de cálculo é, basicamente, o mesmo que no método de Lux e Hinchliff (1995), com a diferença que o rácio l/w , é aqui, substituído pelo ângulo α como se pode ver na figura 3.10, a qual apresenta o fluxograma das operações executadas pelas folhas de cálculo, no método de Tullis (1985).

Quadro 3.4 – Funções de ajuste às curvas do ábaco de Lux e Hinchliff(1985).

Forma	l/w	Função: $ax^4+bx^3+cx^2+dx+e$					Coef. de correlação R^2
		a	b	c	d	e	
Triangular	0,2	7,691	-11,130	5,101	1,449	1,636	0,997
	0,3	11,820	-18,840	11,170	-4,444	2,616	0,998
	0,4	6,266	-7,222	3,142	-3,135	3,189	0,998
	0,5	14,780	-23,520	15,520	-7,999	4,193	0,999
	0,6	8,724	-16,70	15,980	-10,790	5,131	0,998
	0,7	9,068	-18,720	19,560	13,510	5,923	0,999
	0,8	1,531	-10,020	19,000	-15,800	6,649	0,999
Trapezoidal	0,2	7,691	-11,130	5,101	-1,449	1,636	0,997
	0,3	11,820	-18,840	11,170	-4,444	2,616	0,998
	0,4	6,266	-7,222	3,142	-3,135	3,189	0,998
	0,5	14,780	-23,520	15,52	-7,999	4,193	0,999
	0,6	8,724	-16,700	15,980	-10,790	5,131	0,998
	0,7	9,068	-18,720	19,560	-13,510	5,923	0,999
	0,8	1,531	-10,020	19,000	-15,800	6,649	0,999

Quadro 3.4 – Funções de ajuste às curvas do ábaco de Tullis(1995).

Forma	α	Função: $ax^4+bx^3+cx^2+dx+e$					Coef. de Correlação R^2
		a	b	c	d	e	
Triangular	6°	-1,097	2,315	-1,319	-0,195	0,484	1,000
	8°	-2,456	5,971	-4,658	0,907	0,503	1,000
	12°	-2,174	5,472	-4,537	1,063	0,490	0,999
	15°	-1,523	4,037	-3,656	1,003	0,490	0,999
	18°	-1,490	4,226	-4,120	1,315	0,490	1,000
	25°	-1,153	3,658	-4,066	1,601	0,478	0,999
	35°	-1,287	3,996	-4,315	1,769	0,482	0,999

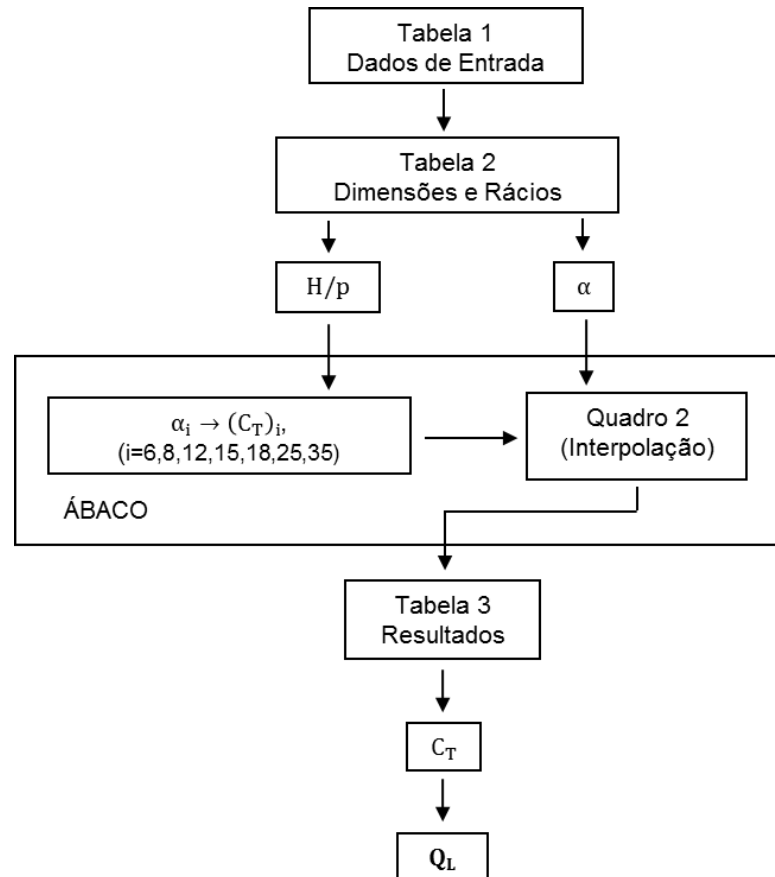


Figura 3.10– Fluxograma do processo de cálculo do caudal Q_L pelo método de Tullis (1995).

3.2.LIMITES DE APLICABILIDADE

Como abordado nas secções 2.1. e 2.2. do capítulo 2, a aplicação dos diversos métodos de dimensionamento de descarregadores com soleira em labirinto pressupõe o cumprimento de vários limites gerais e outros específicos de cada método. Estes limites foram introduzidos na folha de cálculo.

A ferramenta de cálculo prevê a verificação dos seguintes limites gerais, que, como faz notar Falvey (2003), são resultados comuns a todos os autores nos ensaios que estes levaram a cabo:

- O ângulo que a parede do descarregador faz com o sentido do escoamento, α , tem de ser igual ou superior a 6° . Na tabela 2 – “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros” – na coluna de α sempre que o valor deste ângulo for inferior a 6° , aparecerá a mensagem de erro: “Menor que 6 graus”, (Fig. 3.11);
- O parâmetro H/p terá de ter um valor compreendido entre 0 e 0,9, em caso contrário na coluna reservada a este rácio na tabela 2, aparecerá a mensagem de erro: “Maior que 0,9”, (Fig. 3.11);
- O parâmetro l_d/b terá de ter um valor igual ou menor a 0,35. Sempre que este não se verificar, no campo respetivo da tabela 2, aparecerá a mensagem de erro: “Maior que 0,35” (Fig. 3.12).

2. DIMENSÕES DO DESCARREGADOR E OUTROS PARÂMETROS							
Formato	b (m)	l (m) =2b+4a	L (m) =nl	α (°)	p (m)	H (m)	H/p
TRAPEZOIDAL	16,00	36,00	180,00	Menor que 6 graus	2,00	2,00	Maior que 0,9

Figura 3.11– Ângulo α e parâmetro H/p fora dos limites de aplicação da ferramenta de cálculo, e consequentes mensagens automáticas (pormenor da tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Rácios”).

w/p	l_d (comprimento de interferência)	l_d/b
3,00	8,85	Maior que 0,35

Figura 3.12– Parâmetro l_d/b acima do limite (pormenor da tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Rácios”).

Para além destes limites gerais, foram salvaguardados os limites específicos de aplicação de cada um dos métodos, tal como descritos no ponto 2.2. do capítulo 2, e que são:

- Método de Hay e Taylor (1970), $3 \leq L/W \leq 8$ e $h/p \leq 0,6$;
- Método de Lux e Hinchliff (1985) para descarregadores triangulares, $2 \leq L/W \leq 8$ e $0,07 \leq h/p \leq 0,76$;
- Método de Lux e Hinchliff (1985) para descarregadores trapezoidais, $3 \leq L/W \leq 8$ e $0,07 \leq h/p \leq 0,76$;
- Método de Tullis (1995), $6^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ e $H/p \leq 0,9$;
- Método de Darvas (1971), $1,4 \leq l/w \leq 8$, $0,2 \leq H/p \leq 0,6$ e $w/p \geq 2$;
- Método de Magalhães e Lorena(1989), $2 \leq l/w \leq 5$, $0,1 \leq H/p \leq 1$ e $w/p \geq 2,5$.

3.3.EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

3.3.1.EXEMPLO 1 - DESCARREGADOR DE FORMA TRIANGULAR

Considere-se um descarregador com soleira em labirinto, com forma triangular, para o qual se pretende calcular o caudal de cheia máximo que poderá descarregar para diferentes alturas da crista da soleira, ou de modo equivalente, para diferentes alturas H .

As dimensões gerais do descarregador consideradas neste exemplo são:

- $W = 30$ m
- $n = 4$ (módulos do descarregador)
- $NMC=100,0$ m
- $C_0= 95,0$ m
- $CC= 99,0$ m
- Parâmetro $l/w=5,0$

Em primeiro lugar é necessário preencher os dados na tabela 1 - “Dados de Entrada” (Figs. 3.13 e 3.14). Sendo um descarregador com forma triangular a medida “a” será nula.

1. DADOS DE ENTRADA				
Nº	PROJECTO	NMC (Nível de máxima cheia)	CC (Cota da Crista)	C ₀ (Cota do pavimento do descarregador)
1	Exemplo 1	100,00	99,00	95,00

Figura 3.13– Exemplo 1: Tabela 1 “Dados de Entrada”(pormenor).

C ₀ (Cota do pavimento do descarregador)	W (m)	n	a (m)	Parâmetro l/w
95,00	30,00	4	0,00	5,00

Figura 3.14– Exemplo 1: Tabela 1 “Dados de Entrada”(pormenor).

As dimensões do descarregador, bem como o valor dos parâmetros mais importantes, surgem automaticamente na tabela 2 – “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros”, tal como apresentado nas figuras 3.15 e 3.16.

2. DIMENSÕES DO DESCARREGADOR E OUTROS PARÂMETROS					
Formato	b (m)	L (m) =2b+4a	L (m) =nl	α (°)	p (m)
TRIANGULAR	18,75	37,50	150,00	11,54	4,00

Figura 3.15– Exemplo 1: Tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros” (pormenor).

p (m)	H (m)	H/p	w (m) =W/n	w/p	l _d (comprimento de interferência)	l _d /b
4,00	1,00	0,25	7,50	1,88	3,35	0,18

Figura 3.16– Exemplo 1: Tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros” (pormenor).

Por parte do utilizador, fica ainda por realizar o processo iterativo que dará o resultado para o método de Hay e Taylor (1970) tal como explanado em 4.1.1., visto este usar a altura h e não a altura total H .

Assim, na tabela 3 – “Resultados”, logo após o preenchimento dos dados de entrada, o campo correspondente ao método Hay e Taylor (1970) aparecerá de acordo com a figura 3.17.

3. RESULTADOS			
HAY E TAYLOR (descarregadores triangulares)			
L/W	$3 \leq L/W \leq 8$ e $h/p \leq 0,6$?	V (m/s) arbitrada	$\Delta V=0$?
5,0	OK		

Figura 3.17– Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” - método de Hay e Taylor (1970), antes do processo iterativo (pormenor).

O primeiro passo do referido processo iterativo consiste em preencher o valor inicial de V na coluna “ V ”. Este valor será arbitrado e, neste caso, considerou-se um valor de $V=1,0$ m/s (Fig. 3.18).

3. RESULTADOS			
HAY E TAYLOR (descarregadores triangulares)			
L/W	$3 \leq L/W \leq 8$ e $h/p \leq 0,6$?	V (m/s) arbitrada	$\Delta V=0$?
5,0	OK	1,00	0,61

Figura 3.18– Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” - método de Hay e Taylor (1970), 1ª iteração (pormenor).

Na coluna “ $\Delta V=0$?” pode ver-se qual a diferença entre a velocidade arbitrada e a que decorre do Q_L entretanto calculado. O processo iterativo continua, por alteração do valor de V até que nesta coluna, correspondente ao valor de ΔV , apareça a indicação “OK”, isto é, quando $\Delta V < 0,01$. O processo iterativo termina e é possível obter o valor definitivo do Q_L . Após algumas iterações, o resultado final, para o exemplo 1, encontra-se nas figuras 3.19 e 3.20.

3. RESULTADOS				
HAY E TAYLOR (descarregadores triangulares)				
L/W	$3 \leq L/W \leq 8$ e $h/p \leq 0,6$?	V (m/s) arbitrada	$\Delta V=0$?	$V^2/2g$
5,0	OK	1,46	OK	0,11

Figura 3.19– Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” - método de Hay e Taylor (1970), resultado final (pomenor).

$V^2/2g$	h	Q_L/Q_N	C_V	Q_L (m ³ /s)
0,11	0,89	4,71	0,626	219,74

Figura 3.20– Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” - método de Hay e Taylor (1970), resultado final (pomenor b).

Quanto aos restantes métodos, os resultados surgem automaticamente após o preenchimento dos dados de entrada (Figs. 3.21 e 3.22).

LUX E HINCHLIFF (descarregadores triangulares)		
$2 \leq l/w \leq 8$ e $0,07 \leq h/p \leq 0,76$?	C_X	Q_L (m ³ /s)
OK	2,853	280,19

Figura 3.21– Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” – valores de Q_L obtidos pelo método de Lux e Hinchliff (1985).

TULLIS	
$6^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ e $h/p \leq 0,9 ?$	$Q_L \text{ (m}^3/\text{s)}$
OK	241,89

Figura 3.22– Exemplo 1: Tabela 3 “Resultados” – valores de Q_L obtidos pelo método de Tullis (1995).

A figura 3.23 mostra a tabela 4 “Quadro Resumo dos Resultados”, que surge do lado direito da tabela dos dados de entrada, permitindo uma rápida visualização e comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos.

4. QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS (Q_L em m^3/s)							
FORMATO	HAY E TAYLOR	LUX E HINCHLIFF	TULLIS	HAY E TAYLOR	LUX E HINCHLIFF	DARVAS	MAGALHÃES E LORENA
TRIANGULAR	219,74	280,19	241,89				

Figura 3.23– Exemplo 1: Tabela 4 - “Quadro Resumo dos Resultados” – resultados finais dos diferentes métodos.

3.3.2.EXEMPLO 2 - DESCARREGADOR DE FORMA TRAPEZOIDAL

Considere-se o mesmo descarregador com soleira em labirinto apresentado em 3.3.1, mas com forma trapezoidal, isto é, com $a \neq 0$. Seja $a = 1,0$ m, mantendo-se todos os outros parâmetros inalterados. Os dados de entrada são apresentados nas figuras 3.24 e 3.25.

1. DADOS DE ENTRADA				
Nº	PROJECTO	NMC (Nível de máxima cheia)	CC (Cota da Crista)	C_0 (Cota do pavimento do descarregador)
1	Exemplo 1	100,00	99,00	95,00
2	Exemplo 2	100,00	99,00	95,00

Figura 3.24– Exemplo 2: Tabela 1 “Dados de Entrada” (pormenor).

C_D (Cota do pavimento do descarregador)	W (m)	n	a (m)	Parâmetro l/w
95,00	30,00	4	0,00	5,00
95,00	30,00	4	1,00	5,00

Figura 3.25– Exemplo 2: Tabela 1 “Dados de Entrada” (pormenor).

Nas figuras 3.26 e 3.27 apresentam-se dois pormenores da tabela 2 resultante, com as dimensões e parâmetros.

2. DIMENSÕES DO DESCARREGADOR E OUTROS PARÂMETROS					
Formato	b (m)	l (m) $=2b+4a$	L (m) $=nl$	α (°)	p (m)
TRIANGULAR	18,75	37,50	150,00	11,54	4,00
TRAPEZOIDAL	16,75	37,50	150,00	6,05	4,00

Figura 3.26– Exemplo 2: Tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros” (pormenor).

p (m)	H (m)	H/p	w (m) $=W/n$	w/p	l_d (comprimento de interferência)	l_d/b
4,00	1,00	0,25	7,50	1,88	3,35	0,18
4,00	1,00	0,25	7,50	1,88	4,45	0,27

Figura 3.27– Exemplo 2: Tabela 2 - “Dimensões do Descarregador e Outros Parâmetros” (pormenor).

Finalmente, a figura 3.28 representa o quadro resumo dos resultados obtidos para o exemplo2.

4. QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS (Q_L em m^3/s)							
FORMATO	Hay e Taylor (triangular)	Lux e Hinchliff (triangular)	Tullis	Hay e Taylor (trapezoidal)	Lux e Hinchliff (trapezoidal)	Darvas	Magalhães e Lorena
TRIANGULAR	219,74	280,19	241,89				
TRAPEZOIDAL				216,75	271,24		213,94

Figura 3.28– Exemplo 2: Tabela 4 “Quadro Resumo dos Resultados” – resultados finais dos diferentes métodos.

4

RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

No presente capítulo será realizada uma análise de sensibilidade aos diferentes parâmetros que definem um descarregador com soleira em labirinto e o seu funcionamento, usando a ferramenta de cálculo automático que foi descrita no capítulo 3. Assim, serão analisados em detalhe, a largura do descarregador, W , e os parâmetros l/w e H/p , que são considerados pela literatura da especialidade, os que mais influência têm no desempenho hidráulico de um descarregador.

4.1. ANÁLISE POR PARÂMETROS**4.1.1. LARGURA TOTAL DO DESCARREGADOR, W**

A largura total do descarregador, W , é um fator que influencia linearmente o caudal. Calculou-se o caudal através do ferramenta de cálculo automático, para os três métodos utilizados para descarregadores triangulares (Hay e Taylor (1970), Lux e Hinchliff (1985) e Tullis (1995)) e os quatro métodos para descarregadores trapezoidais (Hay e Taylor (1970), Darvas (1971), Lux e Hinchliff (1985) e Magalhães e Lorena (1989)), com dez medidas diferentes de largura total do descarregador, mantendo todos os restantes parâmetros fixos com os seguintes valores: $n=3$; $p=4,0$ m; $H=1,0$ m; $l/w=5,0$ e $a=0$ (descarregadores triangulares) ou $a=1,0$ m (descarregadores trapezoidais).

Os resultados obtidos encontram-se representados nas figuras 4.1. e 4.2, para descarregadores triangulares e trapezoidais, respetivamente. Pela análise das figuras verifica-se que os resultados não diferem significativamente pelo facto de um descarregador ter forma triangular ou trapezoidal.

No caso dos descarregadores triangulares, o método de Lux e Hinchliff (1985) apresenta valores mais elevados para o caudal. O método de Tullis (1995) é, neste parâmetro, mais conservador, apesar dos valores serem muito próximos dos obtidos pelo método de Hay e Taylor (1970). Para valores de W superiores a 50 m, os caudais obtidos por estes dois métodos são praticamente coincidentes, o que poderá ser explicado, em parte, pelo pequeno comprimento da parede linear do descarregador, a , que está limitada pelo ângulo, α , ao mínimo de 6° que as paredes longitudinais têm de fazer com o sentido do escoamento.

Nos descarregadores trapezoidais os métodos de Hay e Taylor (1970) e Magalhães e Lorena (1989), são os que apresentam os menores valores, sendo os resultados dos dois métodos coincidentes, e o método de Darvas (1971) o que apresenta os maiores caudais, ligeiramente superiores aos de Lux e Hinchliff (1985).

De notar que o intervalo de valores dentro do qual cada método fornece resultados, varia com as condições de aplicabilidade de cada um, que se mostram bastante diferentes, tal como descrito no ponto 2.3.1 do capítulo 2.

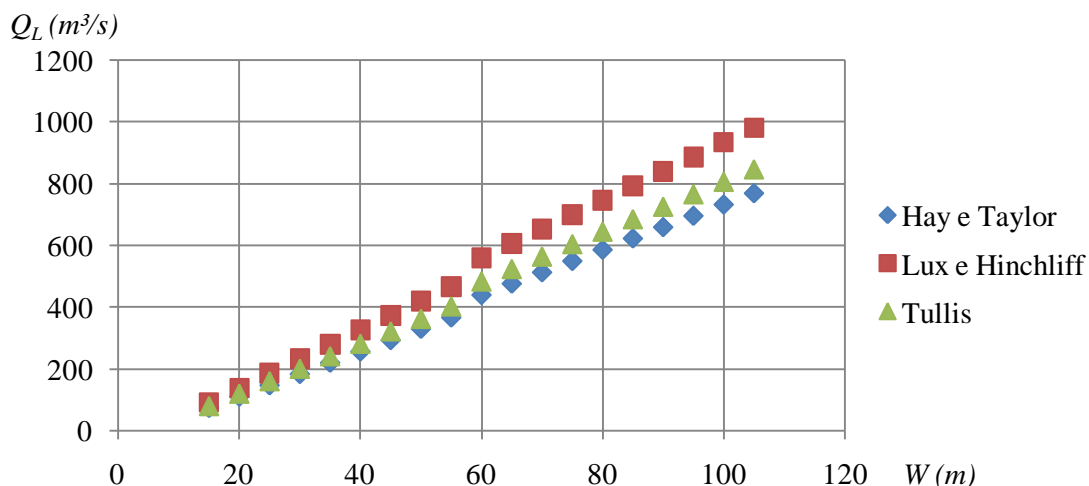


Figura 4.1– Variação do caudal, Q_L , em função da largura total do descarregador, W , para descarregadores triangulares.

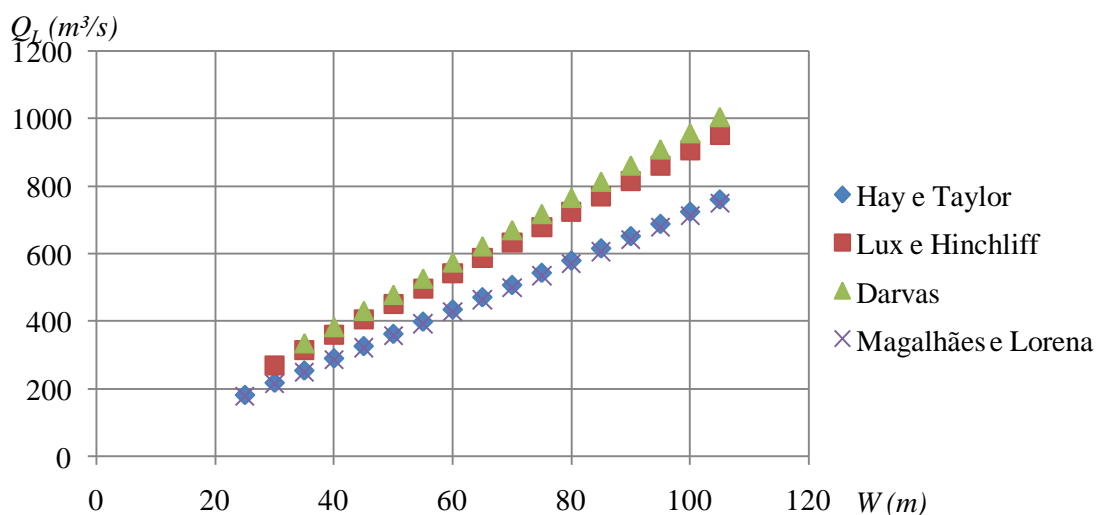


Figura 4.2– Variação do caudal, Q_L , em função da largura total do descarregador, W , para descarregadores trapezoidais.

4.1.2. VARIAÇÃO DO PARÂMETRO L/W

Nos gráficos das figuras 4.3. e 4.4. estão representadas, para descarregadores triangulares e trapezoidais respetivamente, as curvas correspondentes a dez valores diferentes do parâmetro L/w (mantendo os restantes parâmetros fixos), para todos os métodos considerados no estudo. A análise das figuras permite constatar que a relação entre L/w e o caudal é aproximadamente linear.

Nos descarregadores triangulares o método de Hay e Taylor (1970) é, desta vez, o mais conservador. De notar que para o valor de $L/w \approx 8,0$, deixam de ser válidas as condições de aplicabilidade nos métodos de Lux e Hinchliff (1985) e Hay e Taylor (1970). Deverá assim, considerar-se o valor máximo $L/w = 8,0$, em descarregadores triangulares.

Em descarregadores trapezoidais, de forma semelhante, verifica-se que para valores de L/w aproximadamente superiores a 8, as condições de aplicabilidade dos métodos deixam de ser válidas,

uma vez que para $l/w > 8,0$ se obtêm valores do ângulo α inferiores ao limite mínimo de 6° . Da análise da figura 4.4 pode-se verificar que os métodos de Lux e Hinchliff (1985) e Darvas (1971) dão origem a maiores caudais, sendo os valores coincidentes para $l/w < 4$. À semelhança do verificado em 4.1.1, os métodos de Hay e Taylor (1970) e Magalhães e Lorena (1989) são mais conservativos, verificando-se a coincidência dos resultados dos dois métodos para $l/w > 5$.

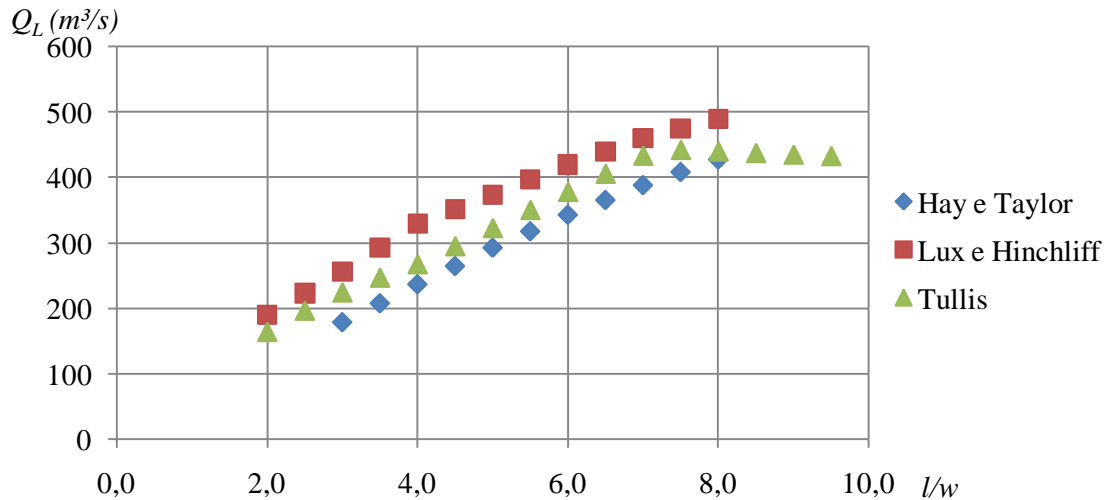


Figura 4.3– Variação do caudal, Q_L , em função do parâmetro l/w , para descarregadores triangulares.

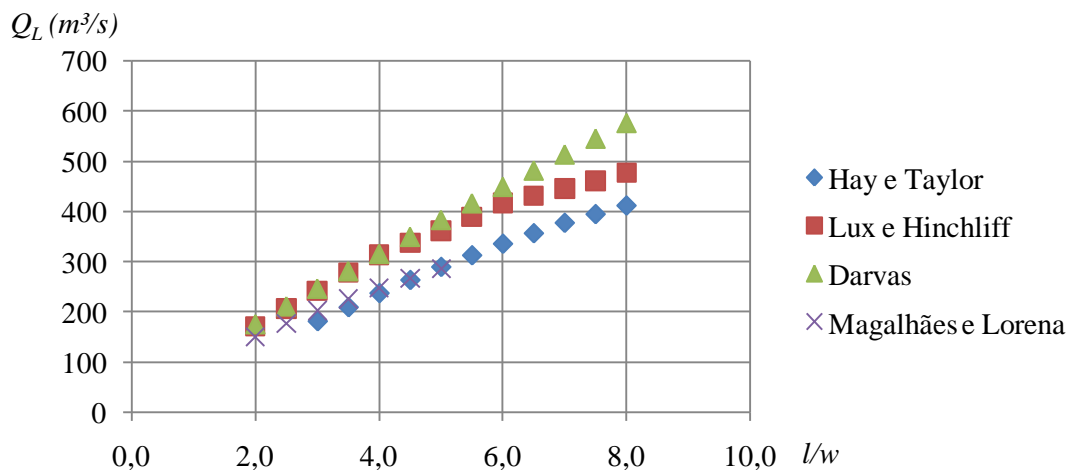


Figura 4.4– Variação do caudal, Q_L em função do parâmetro l/w , para descarregadores trapezoidais.

4.1.3. VARIAÇÃO DO PARÂMETRO H/p

Nesta análise de sensibilidade foram considerados vinte valores distintos de H/p , para cada um dos métodos de cada tipo de descarregador. Os resultados das figuras 4.5 e 4.6, respetivamente para descarregadores triangulares e trapezoidais, mostram um aumento acentuado do caudal para os valores mais baixos de H/p (até aproximadamente 0,40), que vai progressivamente diminuindo a sua razão de

incremento, atingindo-se o valor máximo de caudal para valores aproximados de $H/p=0,8$ no caso dos descarregadores triangulares, e $H/p=0,7$ no caso dos descarregadores trapezoidais.

Verifica-se, pela análise da figura 4.5, que no caso dos descarregadores triangulares, os diferentes métodos dão resultados muito próximos uns dos outros, sendo os do método de Lux e Hinchliff (1985) ligeiramente superiores aos dos restantes. No caso dos descarregadores trapezoidais, de acordo com a figura 4.6, a dispersão é maior, registando-se, para $H/p=0,5$, uma diferença de cerca de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ entre o caudal obtido pelo método de Darvas (1971) e o obtido pelo método mais conservador, o de Magalhães e Lorena (1989), o que para a ordem de grandeza dos valores em análise, é uma diferença que está compreendida num intervalo de 18% a 22% do caudal resultante de cada método.

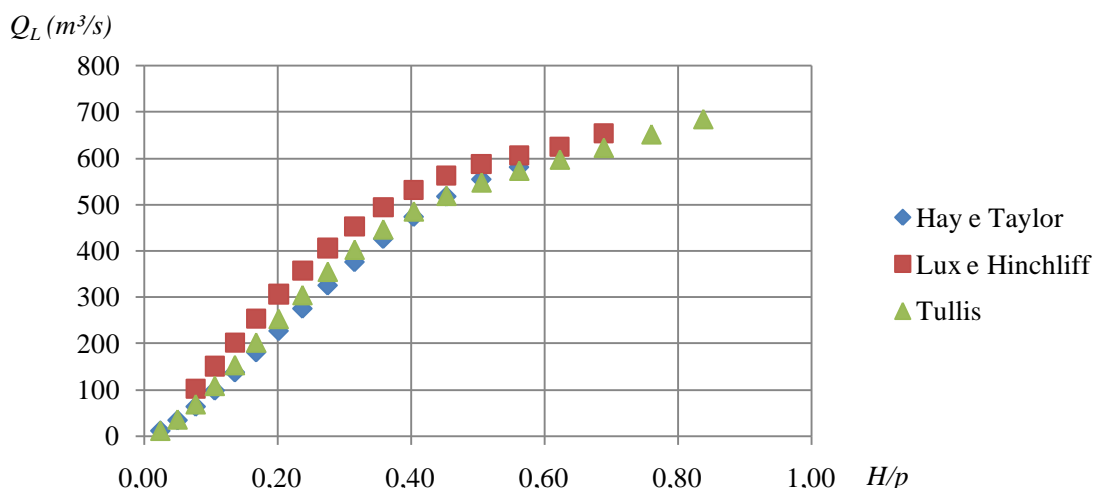


Figura 4.5– Variação do caudal, Q_L , em função do parâmetro H/p , para descarregadores triangulares.

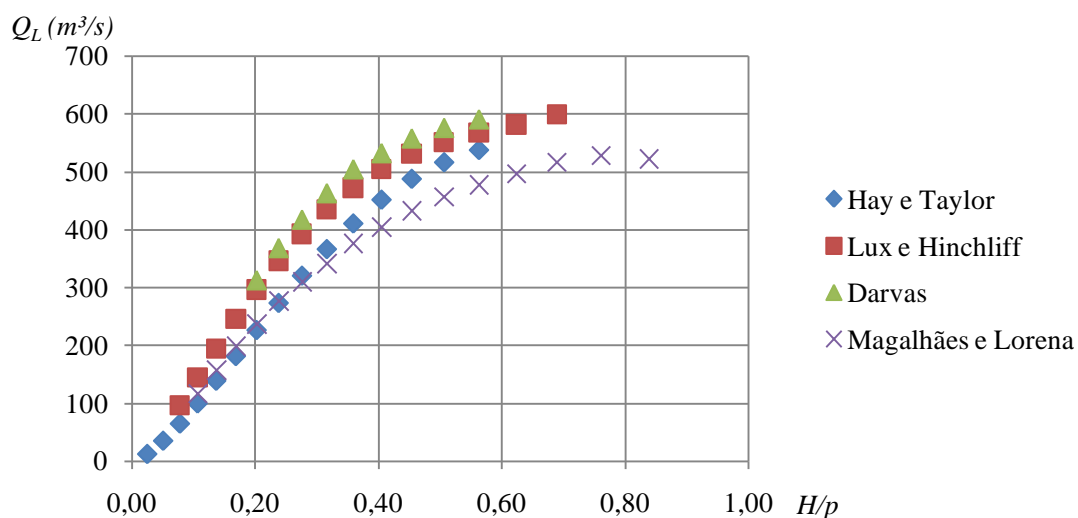


Figura 4.6– Variação do caudal, Q_L , em função do parâmetro H/p , para descarregadores trapezoidais.

4.1.4. VARIAÇÃO DE H

Fixando a altura do descarregador, p , e fazendo variar a altura, H , foram obtidos os caudais pelos diferentes métodos, que se apresentam nas figuras 4.7 e 4.8, para descarregadores triangulares e trapezoidais, respetivamente. Pode-se constatar que, independentemente do tipo de descarregador, a variação do caudal com a altura H é aproximadamente linear. Por outro lado, verifica-se que os intervalos de aplicabilidade dos métodos são, em contrapartida, bastante diferentes uns dos outros:

- Nos descarregadores triangulares (Fig. 4.7), o método de Tullis (1995) é o que garante o maior intervalo de aplicabilidade, enquanto que o método de Hay e Taylor (1970), o que origina o mais pequeno;
- Nos descarregadores trapezoidais (Fig. 4.8), o método de Magalhães e Lorena (1989) é o que tem o maior intervalo de aplicação e o de Darvas (1971) o menor.

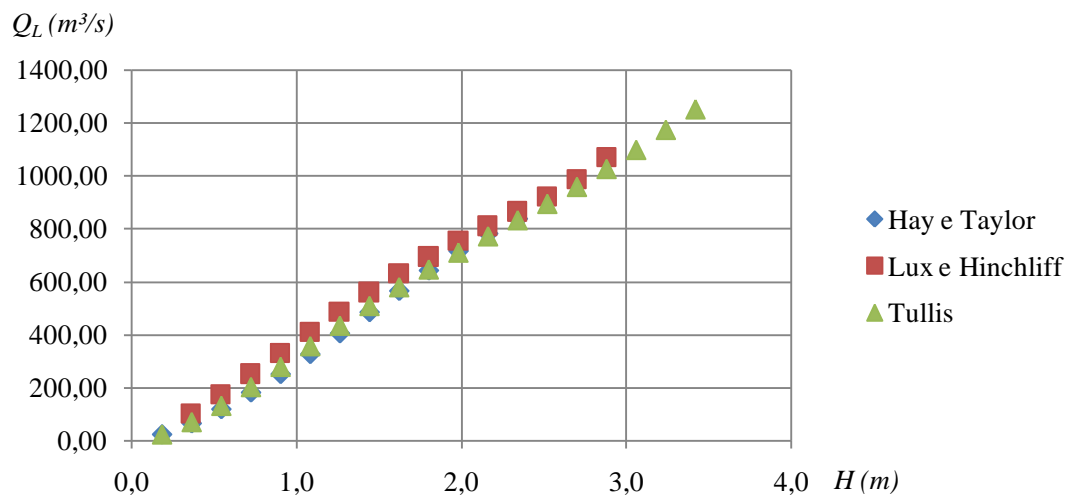


Figura 4.7—Variação do caudal, Q_L , em função da altura, H , para descarregadores triangulares.

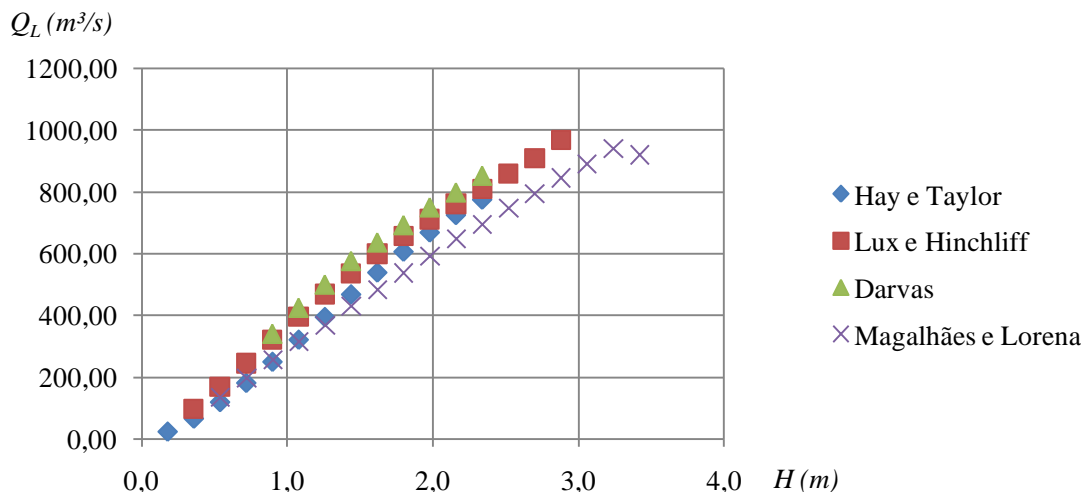


Figura 4.8—Variação do caudal, Q_L , em função da altura, H , para descarregadores trapezoidais.

4.1.5. VARIAÇÃO DE P

Pretende-se, com esta análise, verificar a influência que a altura do descarregador, p , tem no caudal descarregado. Para isso, fixou-se a carga total, $H = 1,0\text{m}$, e obteve-se o resultado de dez medidas de alturas do descarregador, p , diferentes.

Nos descarregadores triangulares (Fig. 4.9), verifica-se que o método de Lux e Hinchliff (1985) é o que apresenta valores mais altos de caudal, principalmente para valores de p superiores a $3,00\text{m}$, altura a partir da qual os valores obtidos pelos métodos de Hay e Taylor (1970) e Tullis (1995), estabilizam em valores de cerca de $300,00\text{m}^3/\text{s}$.

Nos descarregadores trapezoidais (Fig 4.10), os métodos de Lux e Hinchliff (1985) e Darvas (1971), apresentam resultados superiores de caudal em relação aos métodos de Hay e Taylor (1970) e Magalhães e Lorena (1989), sendo que estes últimos, estabilizam em valores de caudal de cerca de $300,00\text{m}^3/\text{s}$, para alturas do descarregador, p , superiores a $4,00\text{m}$.

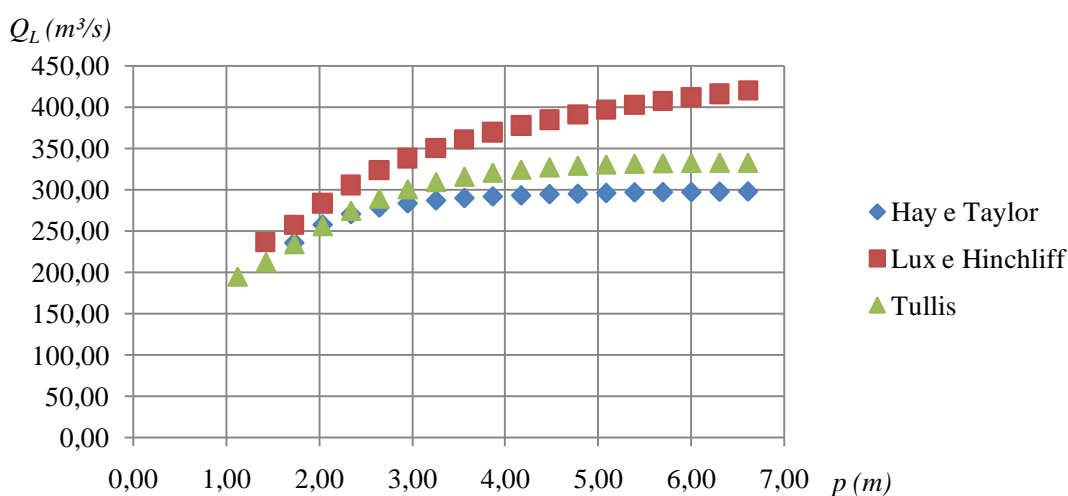


Figura 4.9—Variação do caudal, Q_L , em função da altura do descarregador, p , para descarregadores triangulares.

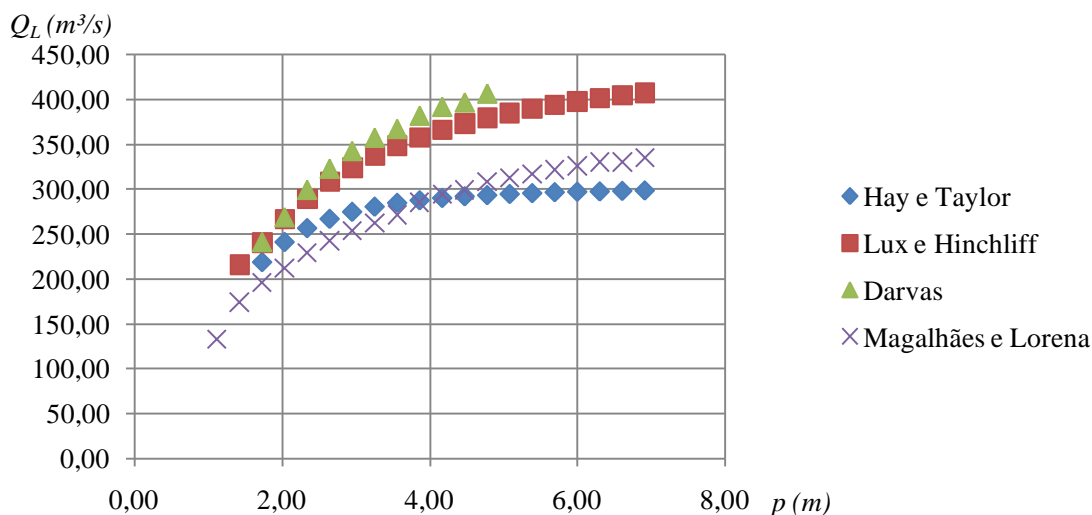


Figura 4.10—Variação do caudal, Q_L , em função da altura do descarregador, p , para descarregadores trapezoidais.

4.2. ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS

O cálculo dos caudais através dos vários métodos apresentados pode, para os mesmos dados de entrada, originar resultados com diferenças significativas entre eles. Importa saber a magnitude dessas diferenças. Para isso, apresentar-se-ão gráficos com o desvio padrão que os métodos apresentam para cada parâmetro analisado, bem como, a distância do resultado dos diferentes métodos para a média dos resultados. Assim, foram realizados cálculos com dez exemplos de descarregadores, divididos em dois grandes grupos – descarregadores de forma triangular e de forma trapezoidal – e em cada um destes, avaliados em dois parâmetros: l/w e H/p .

4.2.1. DESCARREGADORES TRIANGULARES

4.2.1.1. Parâmetro l/w

Considerou-se o mesmo intervalo de variação do parâmetro l/w que serviu para a análise no ponto 4.1.2, isto é, entre 2,00 e 9,50, a que correspondem dezasseis exemplos dentro dos limites de validade, mantendo inalterados os restantes parâmetros que serviram para a análise efetuada no ponto 4.1. (quadro 4.1). Os caudais resultantes estão representados no quadro 4.2.

A metodologia de análise dos resultados consistiu, em primeiro lugar, no cálculo da média dos caudais dos diferentes métodos, para cada um dos exemplos, em seguida calculou-se o valor absoluto da diferença entre os resultados de cada método e a média entretanto calculada. Por fim, o método eleito corresponde ao menor destes valores (quadro 4.3).

Quadro 4.1– Dados para a comparação dos métodos em relação ao parâmetro l/w , em descarregadores triangulares.

Nº	Parâmetro l/w	NMC (m)	CC (m)	C_o (m)	W (m)	n	a (m)
1	2,00	100,00	99,00	95,00	40,00	3	0,00
2	2,50						
3	3,00						
4	3,50						
5	4,00						
6	4,50						
7	5,00						
8	5,50						
9	6,00						
10	6,50						
11	7,00						
12	7,50						
13	8,00						
14	8,50						
15	9,00						
16	9,50						

Quadro 4.2– Caudais resultantes, Q_L , da variação no parâmetro l/w , em descarregadores triangulares (em m^3/s).

Nº	Hay e Taylor	Lux e Hinchliff	Tullis
1		190,36	163,44
2		225,63	195,10
3	179,41	263,29	223,32
4	208,77	304,64	247,33
5	237,85	346,56	270,41
6	267,71	378,42	301,37
7	297,27	412,09	332,59
8	325,78	450,42	363,79
9	354,40	490,47	395,24
10	383,05	525,99	426,89
11	390,91	467,86	436,74
12	416,85	498,72	452,01
13	443,29	531,23	456,37
14			461,31
15			467,05
16			473,71

Os valores dos caudais do quadro 4.2 encontram-se representados na figura 4.11, assim com os valores da média e do desvio padrão.

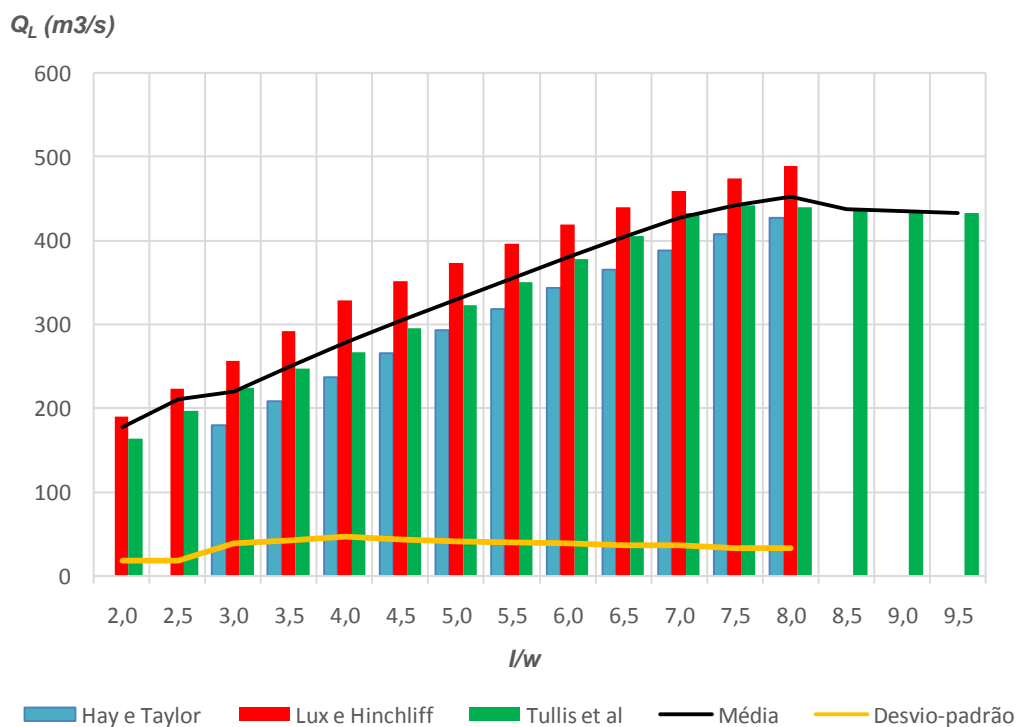


Figura 4.11–Valores do caudal, Q_L , em função do parâmetro l/w , em descarregadores triangulares

Pela análise da figura 4.11, verifica-se que o método de Tullis (1995), para descarregadores com estes parâmetros e pelos critérios adotados, afigura-se, claramente, como o método que mais se aproxima da média dos três, sendo que os métodos de Hay e Taylor (1970) e Lux e Hinchliff (1985) os que mais se distanciam. O desvio padrão é mais alto para valores de l/w entre 2,50 e 5,50, sendo que para valores mais altos a distribuição se torna menos dispersa.

4.2.1.2. Parâmetro H/p

Neste caso, similarmente ao que foi efetuado em 4.1.3, o valor do parâmetro l/w foi fixado em 5,0 - um valor médio no âmbito do dimensionamento de descarregadores com soleira em labirinto (Falvey, 2003) - sendo que H/p variou entre 0,05 e 0,86 (quadro 4.4).

Quadro 4.3– Dados de entrada – descarregadores triangulares – parâmetro H/p variável.

Nº	NMC (m)	CC (m)	C _o (m)	W (m)	n	a (m)	Parâmetro l/w
1	99,18	99,0	95,00	40,00	3	0,00	5,00
2	99,36						
3	99,54						
4	99,72						
5	99,90						
6	100,08						
7	100,26						
8	100,44						
9	100,62						
10	100,80						
11	100,98						
12	101,16						
13	101,34						
14	101,52						
15	101,70						
16	101,88						
17	102,06						
18	102,24						
19	102,42						
20	102,60						

No quadro 4.4 apresentam-se os caudais resultantes da variação do parâmetro H/p , nas vinte combinações consideradas.

Quadro 4.4– Caudais resultantes, Q_L , da variação no parâmetro H/p , em descarregadores triangulares (em m^3/s).

Nº	Hay e Taylor	Lux e Hinchliff	Tullis
1	22,90		23,90
2	64,70	101,31	70,49
3	118,44	173,68	131,83
4	181,51	250,70	202,81
5	251,28	329,64	279,13
6	326,87	408,54	357,27
7	405,20	485,82	434,52
8	485,30	560,07	509,05
9	565,85	630,14	579,90
10	643,24	695,28	646,90
11	716,65	755,40	710,59
12	782,87	811,43	772,08
13	838,85	865,65	832,84
14		922,14	894,51
15		987,26	958,63
16		1070,17	1026,41
17			1098,35
18			1173,99
19			1251,53

Usando a mesma metodologia que foi utilizada para o parâmetro l/w , elaborou-se o gráfico da figura 4.12, que mostra a distância do resultado obtido por cada método para a linha da média. O desvio padrão neste parâmetro apresenta valores mais baixos do que no parâmetro l/w , o que visualmente é também patente: menor dispersão.

Pela análise da figura 4.12, verifica-se que o método de Tullis (1995) é o que apresenta maior intervalo de aplicabilidade e de todos o que dá valores mais abaixo da média, isto é, mais conservativos. O método de Lux e Hinchliff (1985) é o que apresenta valores mais acima da média e o método de Hay e Taylor (1970), aquele cujos valores mais próximos estão da média.

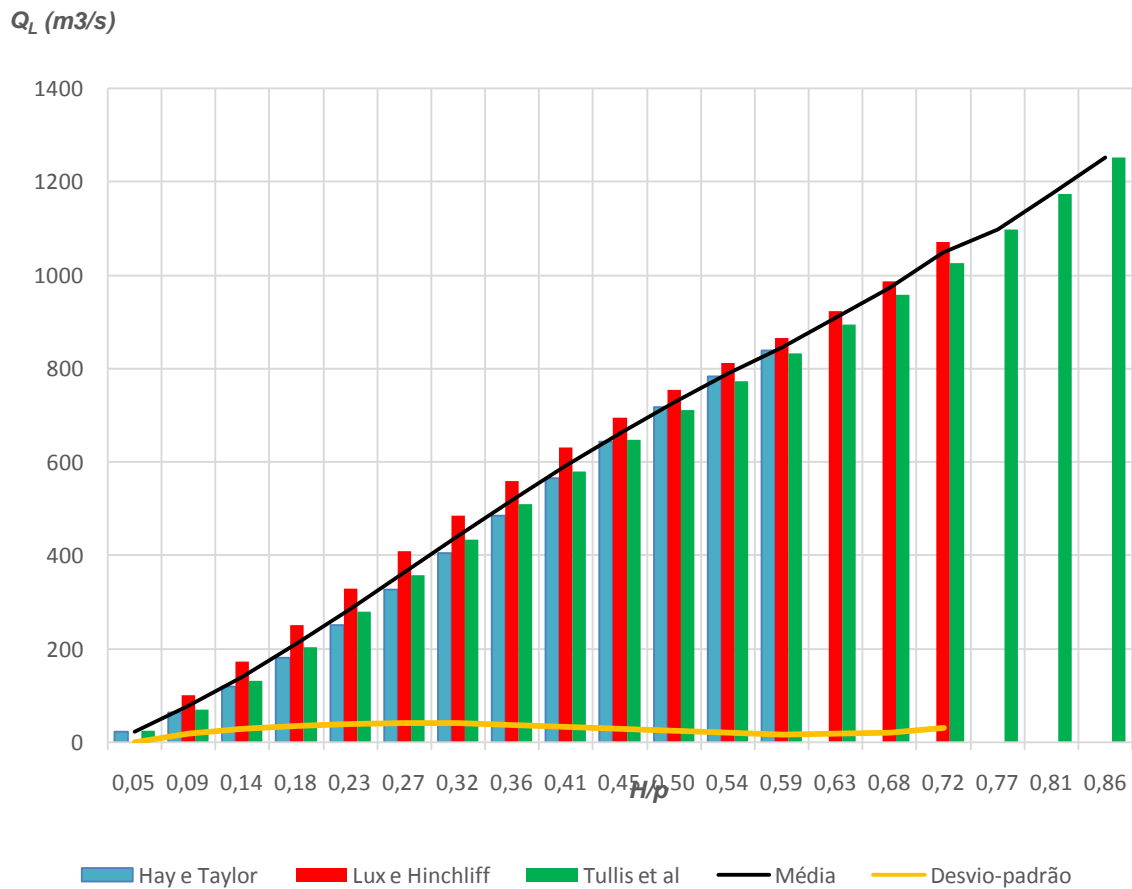


Figura 4.12–Valores do caudal, Q_L , em função do parâmetro H/p , em descarregadores triangulares

4.2.2.DESCARREGADORES TRAPEZOIDAIS

4.2.2.1.Parâmetro l/w

O processo repete-se, à semelhança do apresentado em 4.2.1.1. O parâmetro l/w varia entre 2,00 e 9,50, enquanto todos os outros parâmetros estão fixos (quadro 4.5), alterando-se apenas a medida da parte linear do descarregador, a , para $a=1,0$ m. Para valores do parâmetro l/w acima de 8,00, nas condições acima descritas, o descarregador fica fora das condições de validade em todos os métodos, resultando neste caso em 13 combinações válidas. Os caudais que resultam da aplicação dos vários métodos estão representados no quadro 4.6.

Quadro 4.5– Dados de entrada para análise do efeito da variação de l/w em descarregadores de forma trapezoidal.

Nº	Parâmetro l/w	NMC (m)	CC (m)	C_o (m)	W (m)	n	a (m)
3	2,00	100,00	99,00	95,00	40,00	3	1,00
3	2,50						
3	3,00						
4	3,50						
5	4,00						
6	4,50						
7	5,00						
8	5,50						
9	6,00						
10	6,50						
11	7,00						
12	7,50						
13	8,00						
14	8,50						
15	9,00						
16	9,50						

Quadro 4.6–Caudais resultantes, Q_L , da variação no parâmetro l/w , em descarregadores trapezoidais (em m^3/s).

Nº	Hay e Taylor	Lux e Hinchliff	Darvas	Magalhães e Lorena
1		171,42	174,61	150,78
2		206,79	210,16	177,40
3	181,43	242,16	245,30	202,34
4	209,16	277,82	280,05	225,59
5	237,10	313,48	314,40	247,16
6	263,11	337,57	348,35	267,05
7	289,00	361,65	381,91	285,26
8	312,02	389,33	415,06	
9	334,87	417,02	447,82	
10	355,71	431,26	480,17	
11	376,33	445,51	512,13	
12	393,58	461,17	543,69	
13	410,55	476,83	574,85	

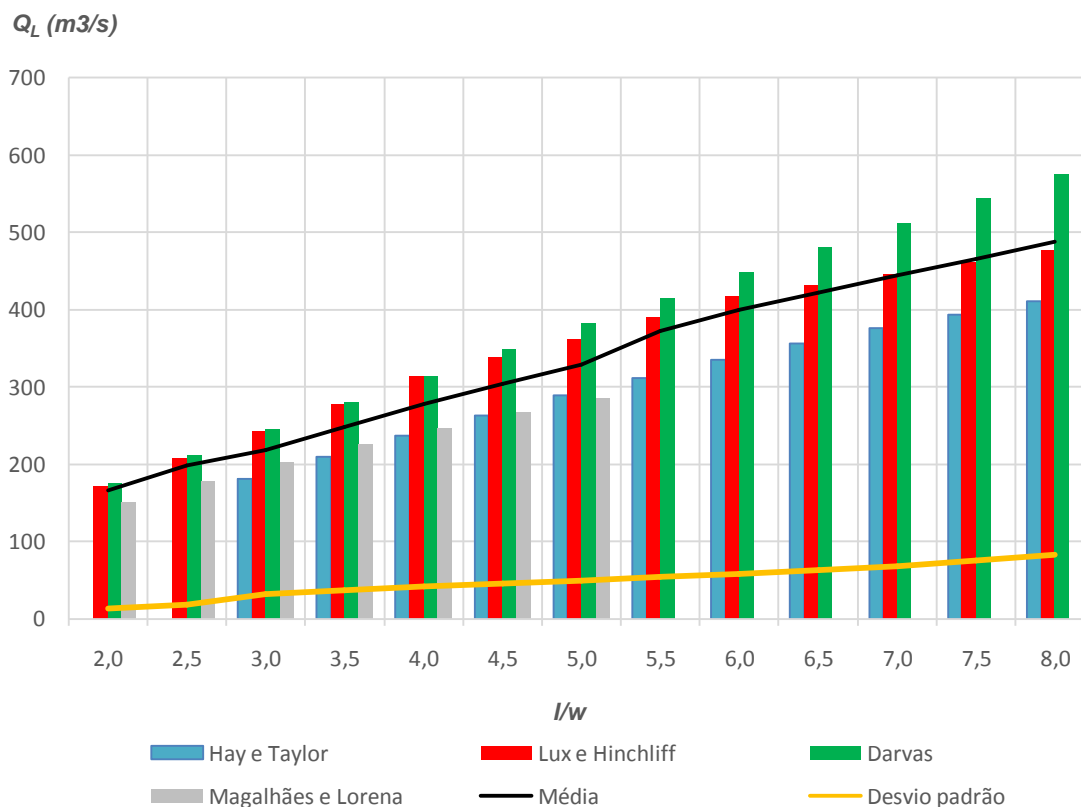


Figura 4.13—Valores do caudal, Q_L , em função do parâmetro l/w , em descarregadores trapezoidais

Analisando o gráfico da figura 4.13, verifica-se que o método de Darvas (1971) apresenta valores de caudal superiores a todos os outros métodos. O método de Lux e Hinchliff (1985) também apresentando valores acima da média para valores de l/w de 2,5 a 6,0, aproximadamente, acima destes valores alinha com os valores médios.

Os métodos mais conservativos são os métodos de Hay e Taylor (1970) e o método de Magalhães e Lorena (1989), que fornecem valores de caudal sempre abaixo da média, acerca deste último, é o que tem o intervalo de aplicabilidade mais curto, apenas é válido para valores de l/w que estejam compreendidos entre 2,0 e 5,0.

O valor do desvio padrão cresce à medida que o valor de l/w sobe, sendo que este parâmetro, em descarregadores trapezoidais, apresenta uma maior dispersão do que em descarregadores triangulares (Fig. 4.11).

4.2.2.2. Parâmetro H/p

Finalmente, apresenta-se a análise do parâmetro H/p para descarregadores trapezoidais. Como se pode ver pelo quadro 4.7, testou-se um intervalo de valores de H/p entre 0,02 e 0,84, tal como no caso dos descarregadores triangulares. De seguida, no quadro 4.8, estão os caudais resultantes da aplicação dos quatro métodos que se estão a aplicar ao caso dos descarregadores trapezoidais.

Quadro 4.7– Dados de entrada para análise do efeito da variação de H/p em descarregadores de forma trapezoidal.

Nº	NMC (m)	CC (m)	C _o (m)	W (m)	n	a (m)	Parâmetro l/w
1	100,12	99,00	95,00	40,00	3	1,00	5,00
2	100,24						
3	100,36						
4	100,48						
5	100,60						
6	100,72						
7	100,84						
8	100,96						
9	101,08						
10	101,20						
11	101,32						
12	101,44						
13	101,56						
14	101,68						
15	101,80						
16	101,92						
17	102,04						
18	102,16						
19	102,28						
20	102,40						

Quadro 4.8—Caudais resultantes nos 4 métodos em descarregadores trapezoidais sujeitos a variação do parâmetro H/p (valores em m^3/s).

Nº	Hay e Taylor	Lux e Hinchliff	Darvas	Magalhães e Lorena
1	12,51			
2	35,35			
3	64,98	96,61		
4	99,84	143,96		117,25
5	138,98	194,14		157,67
6	181,70	245,47		199,11
7	226,66	296,47	312,91	237,21
8	273,54	345,79	368,46	276,91
9	320,64	392,23	417,62	309,90
10	366,66	434,69	463,30	341,21
11	410,96	472,27	504,62	376,45
12	452,01	504,29	532,42	404,44
13	488,10	530,49	557,88	432,39
14	516,71	551,15	576,01	456,80
15	537,98	567,43	590,81	477,34
16		581,77		496,16
17		598,57		516,45
18				527,59
19				521,83

Na figura 4.14 é apresentado o gráfico com os valores do quadro 4.8, de forma a ilustrar a comparação entre os diferentes métodos. Neste caso, não há um método que se destaque, de forma clara, dos restantes. Para os valores mais baixos de H/p , os que mais se aproximam da média são os métodos de Hay e Taylor (1970) e Magalhães e Lorena (1989), para valores intermédios são os métodos de Hay e Taylor (1970) e Lux e Hinchliff (1985) e para valores mais altos, volta-se a destacar o de Magalhães e Lorena (1989) bem como o de Lux e Hinchliff (1985). Note-se que o método de Darvas (1971) se destaca por nunca ser o que origina menores diferenças em relação à média e de, pelo contrário, apresentar sempre a primeira ou segunda maior diferença de todos os métodos.

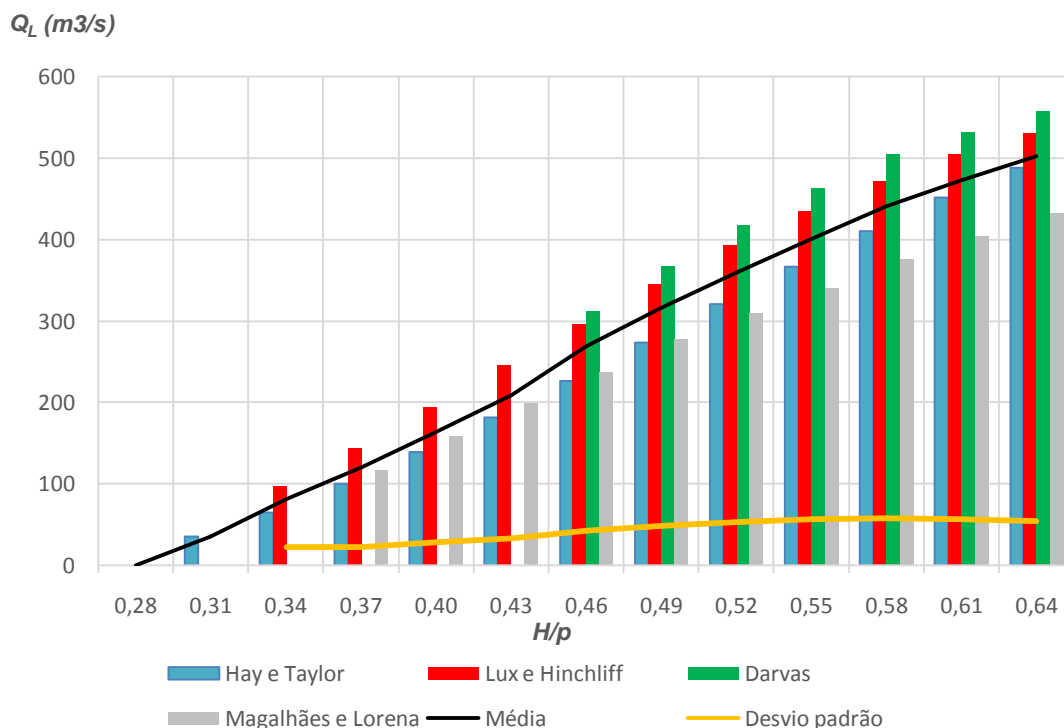


Figura 4.14—Valores do caudal, Q_L , em função do parâmetro H/p , em descarregadores trapezoidais

Uma análise dos resultados, no caso dos descarregadores de soleira em labirinto de forma triangular, leva a concluir que o método de Tullis (1995) é o que mais se aproxima da média de todos os métodos, tanto no parâmetro l/w como no parâmetro H/p .

No caso dos descarregadores trapezoidais, o método de Lux e Hinchliff (1985), logo seguido do método de Magalhães e Lorena (1989), são os métodos que mais se aproximam, nos dois parâmetros analisados, da média de todos os métodos considerados para esta forma.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**5.1. CONCLUSÕES**

Os descarregadores com soleira em labirinto, são uma das opções mais recentemente estudadas em termos de descarregadores de cheias – os estudos mais aprofundados e sistemáticos datam dos primeiros anos da década de 1970. A revisão bibliográfica efetuada permitiu identificar que:

- i) a investigação deste tipo de descarregadores é essencialmente experimental;
- ii) os primeiros estudos sistemáticos foram realizados por Hay e Taylor (1970) e os mais recentes por Crookston (2010);
- iii) diferentes métodos de cálculo foram identificados: o método de Hay e Taylor (1970), o método de Darvas (1971), o de Magalhães e Lorena (1983 e 1989), Lux e Hinchliff (1985), Tullis (1995).

Da pesquisa bibliográfica constatou-se igualmente que as experiências que estão na base dos diferentes estudos não foram realizadas em modelos que incluíssem todos os tipos de forma em planta, isto é, os autores, regra geral, focaram os seus estudos e ensaios num tipo específico de descarregador e de perfil de soleira, propondo expressões para o cálculo do caudal escoado em função de diferentes parâmetros.

Com base nos diferentes métodos encontrados na literatura, foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo automático em Excel, que permite a aplicação dos diferentes métodos, de uma forma expedita, evitando o recurso a ábacos.

A sistematização e integração numa folha de cálculo, dos diferentes métodos associados aos descarregadores em labirinto existentes na literatura, permitiu realizar uma análise quantitativa de cada dos diferentes métodos.

A partir da folha de cálculo desenvolvida, foi analisada a influência que diferentes parâmetros, nomeadamente a largura do descarregador, W , l/w e H/p , têm na performance do descarregador, (triangular ou trapezoidal).

Finalmente, e com o auxílio da ferramenta de cálculo, realizou-se um estudo da dispersão de resultados obtidos por cada método, através das medidas de dispersão média e desvio padrão. Em descarregadores triangulares, o método de Tullis (1995) mostrou-se o mais próximo da média de todos os métodos, tanto no parâmetro l/w como no parâmetro H/p . Para os descarregadores trapezoidais, considerando a análise do parâmetro l/w , o método de Lux e Hinchliff (1985) é o que fica mais perto da média na maioria dos casos analisados. Considerando o parâmetro H/p , dos quatro métodos aplicáveis, não há um que se destaque por ser o mais próximo da média. Pelo contrário, verificou-se que o método de Darvas (1971) destaca-se por ser o que mais se afasta.

5.2.DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em conta as lacunas identificadas, sugerem-se os seguintes temas para investigação futura:

- Pesquisa de outros métodos e estudos para descarregadores triangulares e trapezoidais e inclusão na ferramenta de cálculo desenvolvido, bem como dos descarregadores em Piano;
- Ensaios em modelo físico que para as mesmas condições, e de forma sistemática testem as três principais formas de descarregadores - retangulares, triangulares e trapezoidais - bem como todos os perfis de crista de soleira;
- Estudo detalhado e ensaio em modelo físico do descarregador em Piano – caso particular dos descarregadores com soleira em labirinto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carvalho, E. (2015). Aproveitamentos Hidráulicos e Obras Fluviais: Apontamentos teóricos e práticos da cadeira de 5º ano da opção de Hidráulica e Recursos Hídricos do curso de Engenharia Civil. FEUP.
- Crookston, B. M. (2010). *Labyrinth Weirs*. Utah State University.
- Crookston, B. M., Paxson G. S., Savage B. M. (2012). *Hydraulic Performance of Labyrinth Weirs For High Headwater Ratios*. 4th IARH International Symposium on Hydraulic Structures. Porto.
- Falvey, H.T. (2003), *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*. USA.
- Hager, W., P. fister, M., Tullis, B. (2015), *Labyrinth Weirs: Developments Until 1985*. 36th IARH World Congress. The Hague, The Netherlands.
- Instituto da Água (2001). *Curso de Exploração e Segurança de Barragens*.
- Lencastre, A. (1984). *Descarregadores de Cheia*.
- Magalhães, A. P. (1983). *Descarregadores em Labirinto*. Lisboa.
- Magalhães, A.P., Lorena, M. (1989). *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*. Lisboa.
- Paxson, G., Savage B. (2006). *Labyrinth Spillways: Comparison of Two Popular USA Design Methods and Consideration of Non- standard Approach Conditions and Geometries*. International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures. Brisbane, Australia
- Pinheiro, A. (2007). *Descarregadores de Cheia em Canal de Encosta*. IST.
- Pinheiro, A. (2006). *Tomadas de Água em Albufeiras*. IST.
- Quintela, A. (1990). *Estruturas Hidráulicas*. IST.
- Sobral, M. (2010). *Barragem na ribeira de Pisão. Anteprojecto dos órgãos hidráulicos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. IST.
- Schleiss, A. J. (2011). *From Labyrinth to Piano Key Weirs – A historical review*. Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011. London.